



**HAL**  
open science

# Les lasers à cavité verticale infrarouge : d'une approche matériau à des géométries de composant innovantes

Guilhem Almuneau

## ► To cite this version:

Guilhem Almuneau. Les lasers à cavité verticale infrarouge : d'une approche matériau à des géométries de composant innovantes. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. tel-00473597

**HAL Id: tel-00473597**

**<https://theses.hal.science/tel-00473597>**

Submitted on 15 Apr 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER - TOULOUSE  
LABORATOIRE D'ANALYSE ET ARCHITECTURE DES  
SYSTÈMES - LAAS/CNRS

# HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

présentée en première version en vue d'obtenir l'Habilitation à  
Diriger des Recherches, spécialité « Composants  
optoélectroniques »

par

Guilhem ALMUNEAU

## LES LASERS À CAVITÉ VERTICALE INFRAROUGE : D'UNE APPROCHE MATÉRIAU À DES GÉOMÉTRIES DE COMPOSANT INNOVANTES

Habilitation soutenue le 12 Mars 2010 devant le jury composé de :

Prof.	JEAN-MICHEL GÉRARD	CEA Grenoble	(Rapporteur)
Prof.	ANDREA FIORE	Technische Universiteit Eindhoven	(Rapporteur)
M <sup>r</sup>	CHRISTIAN SEASSAL	INL-ECL Lyon	(Rapporteur)
M <sup>r</sup>	JÖRG TROGER	Oclaro Zürich	(Invité)
Prof.	ADNEN MLAYAH	CEMES-UPS	(Président)
M <sup>me</sup>	CHANTAL FONTAINE	LAAS-CNRS	(Directrice)





*« Lemma of New Technology :*

*The principal applications of any sufficiently new and innovative technology have always been — and will continue to be — applications created by that technology. »*

*Herbert Krömer*

*« Comme vous me regardez, je suis incapable de reconnaître un rayon laser d'une corde à linge ordinaire, ou d'un chien qui pète d'un avion qui renifle ; et pourtant la Science c'est pas de la merde, hein !  
Le savant le sait bien lui, que sans la Science, l'Homme ne serait juste qu'un cupide animal sautement occupé à s'adonner aux vains plaisirs de l'amour dans les folles prairies de l'insouciance. Alors que la Science et la Science seule a pour lui apporté patiemment, aux fil des siècles, le parc-mètre automatique et l'horloge pointeuse, sans lesquels il n'y a pas de bonheur possible.  
Et s'il n'y avait pas la Science ; malheureux cloporte boursoufflé d'ingratitude et d'ignorance crasse ; combien d'entre nous pourraient profiter de leur cancer pendant plus de cinq ans ?  
Et n'est ce pas un triomphe absolu de la Science que d'avoir permis, qu'aujourd'hui, sur la décision d'un vieillard californien de plus en plus impuissant, ou celle d'un fossile ukrainien complètement gateux, l'Homme peut faire sauter sa planète en moins d'une seconde, quarante fois, sans bouger les oreilles ?  
Comme disait Fucius, qui d'ailleurs avait oublié d'être con : une civilisation sans Science, c'est aussi absurde qu'un poisson sans bicyclette. »*

*Pierre Desproges*

# TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vi
Préface	1
1 ÉPITAXIE ET CONCEPTION DE LASERS À CAVITÉ VERTICALE ÉMETTANT À 1,55 $\mu\text{M}$	11
1.1 MÉCANISMES DE CROISSANCE : DIFFÉRENCES ET SIMILITUDES ENTRE MBE ET MOVPE POUR LE SYSTÈME DES ARSÉNIURES-ANTIMONIURES . . . . .	13
1.1.1 Cas de la MBE . . . . .	13
1.1.2 Cas de la MOVPE . . . . .	15
1.2 AUTRES SYSTÈMES DE MATÉRIAUX CONTRAINTS POUR L'ÉMISSION IR . . . . .	16
1.2.1 Hétérostructures GaAsSb / InGaAs . . . . .	17
1.2.2 Puits quantiques GaInAsN / GaAs . . . . .	17
1.2.3 Hétérostructures AlGaAsSb / InP . . . . .	18
1.3 CONSIDÉRATION DES PROBLÉMATIQUES ÉLECTRIQUES ET THERMIQUES DANS LA CONCEPTION DES LW-VCSELS . . . . .	19
1.3.1 Propriétés électriques et thermiques des DBRs . . . . .	19
1.3.2 Intérêt de la jonction tunnel dite « Esaki » . . . . .	19
CONCLUSION . . . . .	21
2 TECHNOLOGIES DE CONFINEMENT : EXEMPLE DE L'OXYDATION THERMIQUE HUMIDE	23
2.1 INTÉRÊT ET ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE CONFINEMENT . . .	25
2.2 MAÎTRISE DU PROCÉDÉ DE L'OXYDATION SÉLECTIVE LATÉRALE	27
2.2.1 Contrôle <i>in-situ</i> en temps réel de l'oxydation . . . . .	28
2.2.2 Sur la cinétique du procédé d'oxydation des alliages Al-GaAs à forte teneur en aluminium . . . . .	31
2.2.3 Etudes et démonstrations réalisées au LAAS . . . . .	34
2.3 DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ D'OXYDATION PAR LA SURFACE . . . . .	40
CONCLUSION . . . . .	43
3 NOUVELLES FONCTIONNALITÉS INTÉGRÉES POUR LES LASERS À CAVITÉ VERTICALE	45
3.1 LE VCSEL À CAVITÉS COUPLÉES . . . . .	47
3.1.1 Contexte . . . . .	47

3.1.2	Composant BiVCSEL : pour la génération d'un rayonnement térahertz par photomélangé . . . . .	49
3.2	EXPLOITATION ET GUIDAGE DU SIGNAL LATÉRAL . . . . .	53
3.2.1	Intérêt . . . . .	53
3.2.2	Travaux menés au LAAS . . . . .	55
3.2.3	Perspectives . . . . .	56
3.3	FUNFACS . . . . .	57
3.3.1	Contexte . . . . .	57
3.3.2	Application aux solitons de cavité . . . . .	57
3.4	MIROIR À RÉSEAU DIFFRACTANT SUB-LONGUEUR D'ONDE À BASE D'AlOx . . . . .	60
3.4.1	Principes et contexte . . . . .	60
3.4.2	Exploitation de la technologie AlOx . . . . .	61
	CONCLUSION . . . . .	65
	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	67
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	71
	NOTATIONS . . . . .	87

## LISTE DES FIGURES

1.1	Maîtrise de la composition dans $[Al, Ga]As_xSb_{1-x}$ . . . . .	14
1.2	Relation entre la concentration de flux incident $AsH_3$ et la concentration en As dans le solide. Les courbes calculées à l'équilibre solide-vapeur correspondantes aux différents rapport V/III sont tracées (Ostinelli 2006) . . . . .	15
1.3	Microscopie électronique par transmission d'hétérostructures $InP/AlGaAsSb/InP$ (E. Müller, ETHZ) (gauche), Réflectivité d'un DBR $InP/AlGaAsSb$ 24 périodes réalisé par MOVPE, au centre du wafer 2" et à 12 mm vers le bord (droite). . . . .	16
1.4	Caractérisation en photoluminescence de l'hétérostructure $InP/AlGaAsSb$ , et mesures associées des décalages de bande . . . . .	18
1.5	Diagramme de bande d'une région active sur $InP$ intégrant une jonction tunnel . . . . .	20
2.1	Variation de la taille de diaphragme sur plus de 90 wafers VCSELs en production (ULM Photonics). (Wiedenmann et al. 2006) . . . . .	27
2.2	Four d'oxydation à géométrie horizontale pour l'observation <i>in situ</i> en temps réel du procédé. . . . .	29
2.3	Schéma de principe de la mesure de réflectivité sélectionnée en longueur d'onde pour le contrôle <i>in situ</i> . . . . .	29

2.4	Observation en temps réel de l'oxydation latérale de la couche enterrée dans une structure VCSEL émettant à 850 nm dans le cas de mesas rectangulaire et circulaire. Le temps entre deux clichés consécutifs est de 1 min 30 sec. . .	30
2.5	Evolution du diaphragme d'oxyde au cours du monitoring (cf. fig. 2.4) pour une mesa rectangulaire (largeur=41 $\mu\text{m}$ ) et trois autres circulaires (diamètres = 31, 33 et 35 $\mu\text{m}$ ). . . . .	30
2.6	Photo au MEB d'une coupe de mesa oxydée. La structure consiste en une série de couches de pseudo-alliages $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As})_{n_1}/(\text{AlAs})_{n_2}$ dont la composition et l'épaisseur varient par indentation. . . . .	31
2.7	Dépendance de la vitesse d'oxydation par rapport à la concentration en Al des pseudo-alliages. Insert : même graphe en fonction des épaisseurs des couches unitaires d'AlAs utilisées dans le pseudo-alliage. . . . .	34
2.8	Modification de la profondeur d'oxydation due à la contribution verticale $k_y$ . L'accord entre les données expérimentales et la courbe issue du modèle a été obtenu en reliant le coefficient explicitant la contribution verticale $k_y$ à la composition en Al des barrières. . . . .	36
2.9	Modèle d'oxydation pour les pseudo-alliages : une réaction verticale s'amorce dans l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (gauche) ; si l'épaisseur de cette barrière est assez fine, la couche est totalement oxydée et laisse des pores ouverts pour la diffusion de réactants $\text{H}_2\text{O}$ et de produits de la réaction ( $\text{As}$ , $\text{AsH}_3$ ). .	37
2.10	Vitesse d'oxydation par rapport à l'épaisseur respectivement des couches AlAs pour un pseudo-alliage $0,6 \text{ nmAl}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}/n_2 \text{ nmAlAs}$ (gauche) et des couches $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ pour un pseudo-alliage $n_1 \text{ nmAl}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}/8 \text{ nmAlAs}$ (droite). Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes pleines au modèle simulé. . . . .	37
2.11	Vitesse d'oxydation par rapport à la composition en Al pour un pseudo-alliage : $0,6 \text{ nmAl}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/8 \text{ nmAlAs}$ . . . . .	37
2.12	Image de l'échantillon réalisée par microscopie électronique en Transmission (MET) (collab. P.F. Fazzini LAAS/CEMES) . .	38
2.13	Profil de composition obtenu par spectrométrie de masses d'ions secondaires (SIMS) des différents éléments atomiques présents dans la structure oxydée . . . . .	39
2.14	Schéma de principe de l'oxydation via la surface . . . . .	40
2.15	Application du procédé PAIOx : Motifs oxydés par la surface de l'échantillon (zone oxydée bleutée, et non-oxydée beige) . . . . .	41
2.16	Image MEB de la coupe de l'échantillon oxydé autour de l'interface semiconducteur/oxyde . . . . .	41
2.17	Vue de la surface de la LED réalisée par la technique PAIOx. (a) Test sous pointe au travers d'un contact ITO. (b) Electroluminescence localisée dans les zones non-oxydées transférées. . . . .	42
2.18	Vue en coupe par MET de l'empilement AlOx/GaAs . . . . .	42

3.1	Schéma de la structure et distribution du champ EM selon le profil d'indice. . . . .	49
3.2	Intensité optique en transmission d'un BiVCSEL à 1THz, en fonction des variables de désaccord $\varepsilon$ et $\mu$ . La longueur d'onde du VCSEL est 980 nm, l'épaisseur des cavités est $\lambda/2$ avec 19 périodes pour le DBR de couplage et 14 pour les DBRs fermant les cavités. . . . .	50
3.3	Composant BiVCSEL incluant une cavité active et une autre passive : épitaxie et technologie réalisées à l'UCSB . . . . .	51
3.4	Caractéristique Puissance-tension-courant et spectre d'émission du BiVCSEL fabriqué à l'UCSB . . . . .	51
3.5	Schéma d'une structure BiVCSEL, à deux cavités actives, NPN à trois électrodes, conçue au LAAS . . . . .	51
3.6	Profil SIMS et spectre de réflectivité de la structure épitaxiée par Avalon Photonics . . . . .	52
3.7	Process de fabrication réalisé au LAAS sur une structure BiVCSEL NPN épitaxiée par Avalon Photonics . . . . .	52
3.8	Schéma de principe et exemple de réalisation d'un VCSEL multifonctionnel intégrant émission et détection. . . . .	55
3.9	Caractéristiques d'émission par une cavité et de détection par la seconde cavité, et de tension aux bornes du composant BiVCSEL. . . . .	56
3.10	Métallisation à pont à air . . . . .	58
3.11	Caractéristiques des VCSELs filiformes et répartition de l'émission . . . . .	58
3.12	Uniformisation de l'injection par implémentation de zones localisées isolantes (calculs SILVACO) . . . . .	59
3.13	Schéma du réseau diffractant et paramètres géométriques agissant sur les propriétés de réflectivité. . . . .	60
3.14	Réseau diffractant réalisé par lithographie électronique, gravure ICP et oxydation d'une sous-couche AlAs. . . . .	61
3.15	Variation des réflectivités en fonction d'une variation de l'épaisseur de la couche GaAs en surface structurée, et de la profondeur de gravure du réseau ( $\lambda_{op} = 1 \mu m$ ) . . . . .	62
3.16	Variation de la réflectivité en fonction d'une variation du facteur de remplissage du réseau semiconducteur / air ( $\lambda_{op} = 1 \mu m$ ) . . . . .	63
3.17	Réflectivité mesurée et calcul : les courbes pointillées indiquent les réflectivités aux angles 0 et 16°, la courbe en trait plein est une moyenne de toutes les contributions angulaires . . . . .	63
3.18	Vue synthétique des études prospectives sur les géométries VCSEL pour des fonctionnalités avancées . . . . .	68

# PRÉFACE

Ce préambule relate des différents thèmes de recherche sur lesquels j'ai travaillé à la suite de ma thèse. Une forte constituante de mes travaux de recherche s'est axé autour de la conception et la fabrication de lasers à cavité verticale dans la gamme de longueur d'onde  $0,85\text{-}1,55\ \mu\text{m}$ . La géométrie particulière de cet émetteur et son attractivité dans un contexte applicatif autant pour son intégrabilité que pour son intérêt économique, a dicté les axes de recherche sur les VCSEL. L'adaptation de cet émetteur aux multiples usages ambitionnés par les industriels a incité d'une part à élargir la bande spectrale d'émission, la plus convoitée étant celle des communications optiques, et d'autre part à intégrer sur puce ces composants dans une vision de combinaisons de fonctions élémentaires dans un système optique complexe. Je présente par la suite les contextes dans lesquels ces deux thématiques de recherche se sont développées, et comment s'y sont articulés mes projets de recherche.





## CONTEXTE DES TRAVAUX SUR LES VCSEL AUX GRANDES LONGUEUR D'ONDE

Alors que le premier laser à émission verticale, fonctionnant à  $1,3 \mu\text{m}$ , fut proposé et réalisé par Iga en 1978 ; aucune solution technologique viable pour les VCSELs n'est parvenue jusqu'à aujourd'hui à s'imposer au niveau industriel dans la gamme spectrale  $1,3\text{-}1,55 \mu\text{m}$ , vouée aux télécommunications optiques. Ces longueurs d'onde  $1,3$  et  $1,55 \mu\text{m}$  correspondant aux minima respectifs de dispersion et d'absorption dans les fibres en silice, suscitent toujours un grand intérêt pour le développement des composants VCSELs dans le dessein du large déploiement des réseaux optiques jusque chez l'abonné (FTTH). La réalisation technologique des LW-VCSELs butte sur une incompatibilité des filières matériaux basés sur GaAs ou InP avec la réalisation d'une structure VCSEL monolithique alliant miroirs de Bragg de haute performances (optique, électrique et thermique) et zones actives aux même longueurs d'onde. En effet, le premier VCSEL de Iga montrait déjà les limites des DBRs InGaAsP/InP faute de contraste d'indice entre ces deux alliages. D'autre part, le développement de couches actives dans la gamme telecom sur substrat GaAs n'est parvenu que tardivement avec le composé GaInAsN à une émission efficace vers  $1,3 \mu\text{m}$ , et ne semble pas être une solution envisageable pour  $1,55 \mu\text{m}$ .

La période 1995-2002 de mes recherches s'inscrit dans cette quête de LA combinaison optimale entre alliages III-V pour le VCSEL à  $1,3$  et/ou  $1,55 \mu\text{m}$ . Ma thèse et celle menée par F. Genty, au CEM2 à Montpellier avaient pour but la démonstration de performances suffisantes pour l'intégration de miroirs de Bragg antimonieux au sein de VCSELs infrarouges. Nous avons, F. Genty et moi, étudié l'épitaxie de matériaux (Al)GaAsSb sur InP (Genty et al. 1998), avec les premières démonstrations de DBRs à haute réflectivité à  $1,55$  (Genty et al. 1997) et  $1,3 \mu\text{m}$  (Almuneau et al. 1997). J'ai également, en fin de thèse, mené une étude sur les performances à atteindre avec des miroirs GaSb/AlAsSb et régions actives pour la gamme  $1,55$  jusqu'à  $2 \mu\text{m}$ , avec des résultats très encourageants (Almuneau (1998), Almuneau et al. (1999)). Dans la suite logique de ma thèse, durant mon postdoc, et plus tard dans le groupe R&D de la société Avalon Photonics, nous avons montré les potentialités du système antimonieux sur substrat InP pour réaliser un VCSEL à  $1,55 \mu\text{m}$ .

Dans ce manuscrit d'HDR, j'ai fait le choix d'exposer mes travaux d'après thèse, ainsi le premier chapitre portera sur mes travaux depuis 1999, début de mon postdoc.

Durant mon postdoc, dans le groupe de L. Coldren à l'Université de Californie de Santa Barbara, mon travail a consisté à épauler un étudiant en thèse Eric Hall (1995-2000), dans la croissance par EJM de matériaux antimonieux sur substrat InP, et par extension à la conception et la réalisation du premier VCSEL monolithique à  $1,55 \mu\text{m}$  à base d'antimonieux en accord de maille sur InP. Cette démonstration a trouvé une suite dans un développement à un niveau R&D industriel lorsque j'ai rejoint la société Avalon Photonics en Suisse. Les mêmes matériaux étaient utilisés, mais en utilisant la technique de MOVPE pour la croissance des structures, qui répond mieux aux exigences de production de volume du point de vue de cette société. Ce projet de recherche entrait également dans le cadre d'un

consortium de recherche suisse (NCCR Quantum Photonics), et a permis de financer la thèse de Olivier Ostinelli dont j'ai été le co-encadrant scientifique (2001-2006). Parallèlement, plusieurs approches étaient également évaluées dans d'autres laboratoires, comme le "wafer bonding", notamment dans le groupe du Prof. Bowers de l'UCSB et l'équipe du Prof. Kapon à l'EPFL. Cette dernière méthode concilie les avantages des différents substrats GaAs et InP pour utiliser les filières de matériau les plus appropriés aux DBRs (AlGaAs/GaAs) et aux zones actives à 1,3 et 1,55  $\mu\text{m}$  (InGaAsP/InP) Le problème principal de cette dernière solution étant la complexité de fabrication et la fiabilité de ce système hybride. D'autres solutions ont permis d'aboutir en R&D à des composants VCSELs avec des performances statiques et dynamiques convenables comme avec la filière AlGaInAs/InP (Vertilas), et GaInAsN/GaAs (Cielo Communications/Sandia). Aujourd'hui un nombre très restreint de sociétés exploitant ces différentes approches subsistent, citons Vertilas, BeamExpress, Alight, Picolight, mais aucune ne semble s'imposer sur les marchés visés des telecom, peut-être faute de preuve de fiabilité de ces composants.

## CONTEXTE DES TRAVAUX SUR LA MULTIFONCTIONNALITÉ APPLIQUÉE AUX VCSELs

En réponse au contrecoup de la crise des années 2000, le secteur des composants dont celui des VCSELs rebondit en s'appuyant sur de nouveaux domaines d'applications en pleine expansion. Cette évolution repose sur des améliorations marquantes de la technologie. On notera l'explosion récente des recherches visant une miniaturisation des sources et leur intégration au sein de microsystèmes et de capteurs. Les VCSELs sont donc aujourd'hui parvenus à une maturité et une fiabilité telles que de nombreux champs d'application s'ouvrent à eux, telles que la médecine, l'électronique grand public, ou encore la projection et les liaisons en espace libre avec l'augmentation de la puissance de sortie des composants. Historiquement, l'intérêt pour les VCSELs fut lié au déploiement rapide des réseaux fibrés et des interconnexions, avec une demande de progression des bandes passantes, d'ailleurs toujours d'actualité. La mise en parallèle des canaux du type WDM (Multiplexage en longueur d'onde) était alors accessible à l'aide de cette technologie grâce à sa capacité d'intégration. L'effondrement du marché a mis un terme aux activités d'un bon nombre de sociétés produisant des VCSELs, tandis que les "rescapées" ont dû se tourner vers d'autres applications offrant un potentiel grand public plus large. Les efforts portés sur ces composants, outre la progression de performances, sont d'une part la couverture des fenêtres spectrales (gamme visible et infrarouge - cf. paragraphe précédent -), et d'autre part l'adaptation de ces sources aux systèmes les intégrant. Des solutions doivent être trouvées pour réduire le volume actif du VCSEL, pour qu'ils puissent être utilisés comme microsources. Tandis que du côté industriel, les performances n'ont cessé de s'améliorer grâce à une stabilisation de la technologie à confinement par oxyde, des progrès importants et multiples dans les laboratoires ont été réalisés ces deux dernières années.

C'est dans ce contexte, que dans le groupe Photonique du LAAS, nous

avons mené nos recherches sur les VCSELs dans différentes problématiques applicatives, avec cependant comme fil conducteur d'amener une flexibilité de conception et une généricité au niveau du composant.

Ainsi, à mon arrivée au LAAS en 2004, mes thèmes de recherche ont évolués vers l'étude et l'exploitation de nouvelles fonctionnalités pouvant être intégrés au sein ou à proximité de l'émetteur VCSEL. L'approche scientifique étant alors de montrer la validité d'une approche conceptuelle et générique sur une filière mature de matériaux, en l'occurrence AlGaAs, avant de l'étendre à d'autres systèmes.

Les thèmes de recherche abordés, s'articulent ainsi autour de trois axes thématiques :

- l'amélioration des propriétés d'émission des VCSELs en particulier pour l'application et l'intégration à des microsystèmes,
- les nouvelles structures basées sur la géométrie verticale des VCSELs, en association avec la réalisation de nouvelles fonctions optiques à partir de ces composants,
- le troisième axe de recherche concerne l'amélioration des procédés et géométries, visant à proposer de nouvelles solutions technologiques fiables et reproductibles pour la fabrication de ces composants et la structuration latérale électrique et optique de motifs.

Voici quelques exemples de projets de recherches illustrant ces grandes lignes, et qui seront plus amplement commentés dans ce manuscrit.

## **Applications à l'instrumentation et intégration aux microsystèmes**

### **Projet EU Optonanogen**

L'équipe que j'ai intégrée du groupe Photonique du LAAS travaillait depuis 2002 sur un projet européen IST : Integrated OPTONANOMechanical Biosensor for functional GENomic Analysis (Optonanogen). L'objectif de ce programme était de développer un biocapteur intégré opto-nanomécanique, capable de détecter l'hybridation d'oligonucléotides. L'analyse consiste à immobiliser des acides nucléiques sur un côté actif d'un cantilever micro-usiné, et de détecter la déflexion induite via un système optique couplant une barrette de VCSEL et un système de photodétection 2D. Plus particulièrement, les contraintes d'homogénéité des performances pour la barrette de VCSEL nous ont amenés à optimiser chaque étape technologique de la fabrication des composants. Deux points particulièrement critiques étant la gravure des mésas (qualité des surfaces, forme des flancs) et la maîtrise du diaphragme d'AlOx qui forme le confinement électro-optique. J'ai rejoint ce projet à mi-parcours. Beaucoup d'améliorations avaient été apportées à ces étapes technologiques avant mon arrivée dans le cadre de la thèse de C. Bringer encadrée par V. Bardinal et T. Camps. Mon rôle a consisté dans cette étude à continuer les évolutions et les améliorations en cours, tout en amenant par mon expérience de nouveaux aspects pour stabiliser notamment l'étape d'oxydation latérale.

Nous avons finalement pu réaliser une intégration de barrettes de microlentilles sur celles de VCSELs grâce à un montage délicat. Ces aspect

a donné lieu depuis à un nouvel axe de recherche sur la microoptique polymère animé par V. Bardinal. Au terme du projet, un prototype a pu être assemblé en associant la barette d'émetteur, le système de détection optique et en les insérant dans la tête microfluidique du biocapteur.

### **Projet RNRT OSA<sub>131</sub>**

Dans le cadre de la thèse de Cédric Amat (Février 2004- Juin 2007), nous nous sommes employés à atteindre un double objectif : optimiser le procédé de fabrication des VCSELs à diaphragme d'oxyde enterré élaborés au laboratoire, et optimiser l'intégration de la photodétection dans les lasers ainsi réalisés, pour étendre leurs capacités et potentialités d'application de ces composants. Ces travaux de recherche se sont déroulés dans le cadre du projet RNRT OSA<sub>131</sub> en collaboration avec le CEA-LETI et la société Intexys Photonics. Nous avons proposé des solutions pour obtenir une photodétection plus efficace (exempte de conduction parasite) avec une détection après une section de cavité localement gravée. Dans le but de démontrer la faisabilité de cette approche de détection intégrée pour des VCSELs à modulation rapide, des composants à géométrie adaptée à une utilisation hyperfréquence ont d'abord été fabriqués. La fabrication de ces composants a nécessité l'optimisation de plusieurs procédés en salle blanche : gravure sèche avec l'acquisition d'un bâti de gravure ICP, et le confinement latéral par oxydation thermique humide (AlOx) avec un contrôle plus fin de la production du flux oxydant en vue d'une meilleure stabilité de ce procédé (cf. partie Amélioration des procédés et structuration). Les perspectives qu'ouvrent ces travaux porteront sur l'implantation ionique afin d'isoler émetteur et détecteur ; ainsi que sur l'insertion de structures à cristaux photoniques (stage DEA C. Echampard) pour un guidage de l'émission latérale. Des modélisations dans ce sens ont été engagées à l'aide de logiciels tels que CAMFR (Full vectorial Maxwell solver) (stage DEA M. Suleiman) et par la méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) (Coopération avec Kyungpook Nt'l University, Corée).

L'autre axe de recherche pour la détection intégrée à un VCSEL consiste à utiliser une double microcavité verticale avec un miroir de Bragg intermédiaire afin d'ajuster leur couplage. Cette approche présente l'avantage d'avoir une détection directe de l'émission stimulée et donc un monitoring « fidèle » de la puissance émise. Les difficultés ne sont pas limitées à l'épitaxie mais concernent aussi la réalisation technologique des composants avec des complexités liées à une architecture à trois électrodes et au double confinement par diaphragme d'oxyde.

Les caractéristiques des composants VCSEL à détecteur intégré démontrés dans la thèse de C. Amat montrent que l'application au monitoring est d'ores et déjà réalisable, avec des niveaux de signal utile capable d'être traités. L'utilisation de ces composants en instrumentation est ainsi possible, en particulier à travers des méthodes de mesure par réinjection optique pour lesquelles les modifications du comportement du VCSEL seraient directement identifiables par le détecteur associé. Ce système de détection intégré au composant pourrait être également valorisé en tant que détection précoce d'une détérioration du composant dans des problématiques de vieillissement et de fiabilité. Dans ce contexte, les briques

technologiques déjà développées au cours de cette thèse (gravure ICP, oxydation humide, dépôts diélectriques, etc.), mais aussi les technologies émergentes comme la structuration de surface, la reprise d'épitaxie et la maîtrise fine du confinement optoélectronique par oxydation localisée sont essentielles pour étendre les possibilités d'intégration des VCSEL et diversifier leurs applications.

## **Nouvelles fonctionnalités électro-optiques**

### **FunFACS : VCSELs à solitons de cavité**

Les problématiques spécifiques des VCSELs à large surface d'émission ont été abordées dans le cadre du projet européen FUNFACS. En effet, l'écriture et la manipulation de solitons de cavité dans de telles structures laser requiert une excellente maîtrise des propriétés d'émission, en particulier son homogénéité sur de larges surface du fait de la taille du soliton (de l'ordre d'une dizaine de microns). Ces propriétés spécifiques sont liées intrinsèquement à la distribution des porteurs dans la zone active du VCSEL. Nous avons ainsi étudié différentes approches pour adapter les zones et types de contact électrique à une injection distribuée dans ces composants de large surface. Les solutions technologiques ont été choisies sur la base de calculs de simulation réalisés dans le cadre de la thèse d'E. Harvard (sous la direction de V. Bardinal et T. Camps) : métallisation de la surface d'émission sous forme de grille distribuée, insertion d'une jonction tunnel Esaki facilitant l'étalement latéral, contact transparent type ITO (Indium Tin Oxide), plots isolants localisés permettant une canalisation « guidée » des porteurs injectés. Les composants réalisés avec des contacts d'anode en grilles et ITO ont nécessité des adaptations du procédé de fabrication, en plus du développement des technologies de dépôt d'ITO. Egalement dans le contexte de ce projet FunFACS, en collaboration avec S. Barbay du LPN, nous avons étudié une méthodologie dédiée à la croissance par épitaxie d'une structure VCSEL incluant un empilement aperiodique. Cette structure atypique avait été proposé par S. Barbay afin d'avoir une meilleure efficacité du pompage optique de la cavité. Dans le cadre de la thèse de Moustapha Condé (que j'ai co-encadré avec Chantal Fontaine), nous avons ainsi établi une méthode de caractérisation rapide des structures épitaxiales basée sur la combinaison des mesures par microscopie électronique à balayage (MEB) à haute résolution, de mesures SIMS et de réflectivité optique des empilements. La synthèse des ces mesures nous permettait alors de remonter aux épaisseurs et compositions individuelles des couches de la structure épitaxiée, et de rectifier les erreurs lors des croissances subséquentes.

### **BiVCSEL pour l'émission THz**

Le même composant à cavités couplées que j'ai précédemment abordé dans le cadre de la détection intégrée, peut également donner lieu à une nouvelle fonction optique avec la génération d'un battement entre deux modes lasers rapprochés fréquentiellement. Sur la proposition de L. Chusseau du CEM2 à Montpellier, nous avons collaboré sur la génération d'une onde dans la gamme du THz à partir d'un composant laser compact. Sur

ce dernier point, l'étude avait été initié lors de mon postdoc et a d'autre part fait l'objet d'une action spécifique (AS 207 « Sources & Systèmes THz ») avec le LAAS. Le défi de notre approche est l'obtention de deux modes lasers coexistants dans le VCSEL à double cavité, et dont l'écart spectral soit assez faible pour pouvoir produire un battement THz. Dans ce type de structure, il s'agit à partir de deux cavités strictement identiques de régler l'écart spectral entre les deux modes longitudinaux par découplage au travers de la réflectivité du miroir central.

### **Améliorations des procédés et structurations pour les composants laser (Projet ANR jeune Chercheur EELOT)**

La technique d'oxydation humide permet la formation de couches diélectriques à partir de couches III-V à riche contenu en Al, localisées au sein des structures III-V, ceci dans le but de réaliser des confinements optique et électrique efficaces. Cette technique a constitué pour les sources VCSEL à 850 nm et 980 nm une rupture technologique majeure en apportant une amélioration notable de leurs performances. Néanmoins, on arrive aujourd'hui à un palier dans la progression de ces composants, en partie lié aux limitations de ce procédé. En effet, cette étape de fabrication pose des problèmes de reproductibilité (cas des VCSELs monomodes transverses) et nécessite de fréquentes et coûteuses étapes de calibration supplémentaires. Par ailleurs, et *a fortiori*, elle implique la fabrication préliminaire de *mesas* pour accéder aux flancs de la couche à oxyder. Cette géométrie limite les capacités d'ingénierie des composants et la réduction de taille de leur zone active. Dans le cadre d'une action ATIP (NovAlOx) du département STIC du CNRS, nous avons développé un four d'oxydation performant, qui permette la formation contrôlée de couches AlOx, et de développer la technique d'oxydation AlOx en géométrie planaire. Cette nouvelle technique « PAIOx », que nous avons brevetée, permet une rupture technologique offrant de nouvelles possibilités pour la conception de composants optoélectroniques innovants. Nous avons pu mener ces développements dans le cadre du projet ANR Jeune chercheur EELOT, que j'ai coordonné de 2006 à 2009. Ces aspects ont ainsi pu être étudiés au cours de la thèse de Moustapha Condé et du postdoc d'Isaac Suarez.

D'une part l'amélioration du procédé d'oxydation humide est basée sur la stabilité et la maîtrise précise des paramètres d'oxydation (température du four, dosage mélange eau-gaz, stabilité des flux). De mars 2005 à Février 2006, ce travail de perfectionnement a été amorcé par un stagiaire CNAM P. Collière, avec l'implémentation et l'automatisation d'un nouveau système de régulation et de production du flux gazeux oxydant. Dans la continuité du projet, également mené par un stagiaire CNAM R. Bossuyt, l'innovation a consisté à concevoir et élaborer une nouvelle géométrie de four, compatible avec un suivi in-situ de l'oxydation par contrôle optique. Durant cette étude, nous avons démontré la faisabilité d'une observation en temps réel du front d'oxydation dans un VCSEL, ce qui constitue une première. Cet équipement, qui vient compléter les moyens technologiques de la filière III-V de notre centrale RTB, n'a pas d'équivalent aujourd'hui en Europe, et pourra être valorisé auprès des fabricants de composants VCSELs.

Ces nouveaux outils technologiques performants, nous ont également permis d'étudier plus en détail les modèles théoriques de diffusion et d'oxydation de la littérature. Outre une meilleure compréhension des phénomènes et des différents paramètres mis en jeu, cette modélisation est un moyen complémentaire pour un contrôle affiné du procédé, c'est ce qui a été étudié ces deux dernières années notamment par le postdoc Isaac Suarez.





# ÉPITAXIE ET CONCEPTION DE LASERS À CAVITÉ VERTICALE ÉMETTANT À 1,55 $\mu\text{M}$

1

## SOMMAIRE

1.1	MÉCANISMES DE CROISSANCE : DIFFÉRENCES ET SIMILITUDES ENTRE MBE ET MOVPE POUR LE SYSTÈME DES ARSÉNIURES-ANTIMONIURES . . . . .	13
1.1.1	Cas de la MBE . . . . .	13
1.1.2	Cas de la MOVPE . . . . .	15
1.2	AUTRES SYSTÈMES DE MATÉRIAUX CONTRAINTS POUR L'ÉMISSION IR . . . . .	16
1.2.1	Hétérostructures GaAsSb / InGaAs . . . . .	17
1.2.2	Puits quantiques GaInAsN / GaAs . . . . .	17
1.2.3	Hétérostructures AlGaAsSb / InP . . . . .	18
1.3	CONSIDÉRATION DES PROBLÉMATIQUES ÉLECTRIQUES ET THERMIQUES DANS LA CONCEPTION DES LW-VCSELS . . . . .	19
1.3.1	Propriétés électriques et thermiques des DBRs . . . . .	19
1.3.2	Intérêt de la jonction tunnel dite « Esaki » . . . . .	19
	CONCLUSION . . . . .	21

DANS ce chapitre sera présentée une synthèse des travaux sur l'épitaxie, les propriétés des matériaux et hétérostructures, ainsi que les solutions de conception qui ont été choisies pour la réalisation de VCSELS émettant à 1,55  $\mu\text{m}$ . L'objectif visé étant un composant monolithique dont les performances s'approcheraient des VCSELS standards de la filière AlGaAs. J'ai pu, de 1995 à 2003, approfondir deux techniques de croissance épitaxiale appliquées à un même système de matériaux AlGaAsSb. Je décrirai ces travaux dans ce premier chapitre. Cet alliage possède un double avantage :

- la possibilité d'avoir pour une composition déterminée un paramètre de maille atomique adapté au substrat InP, ceci permettant une épitaxie non-contrainte et minimisant le nombre de défauts,

- d'avoir accès à un contraste d'indices important, condition requise pour atteindre des réflectivités importantes dans les réflecteurs de Bragg.

D'autres systèmes de matériaux ont également été étudiés pour réaliser un VCSEL monolithique pouvant émettre autour de 1,3 ou 1,55  $\mu\text{m}$  (système AlGaInAs sur InP et InGaAsN(Sb) sur GaAs). Ces derniers ont profité de l'appui des méthodes de fabrication mieux maîtrisées et donc plus matures, aux yeux des industriels. Dans une dernière partie de ce chapitre, les implications directes liées aux propriétés des matériaux sur la conception du VCSEL sera décrite. Des aspects comme l'uniformisation de l'injection électrique et l'amélioration des caractéristiques thermiques seront traitées, dans le cas spécifique des LW-VCSELs.

## 1.1 MÉCANISMES DE CROISSANCE : DIFFÉRENCES ET SIMILITUDES ENTRE MBE ET MOVPE POUR LE SYSTÈME DES ARSÉNIURES-ANTIMONIURES

Lorsque plusieurs anions sont mis en commun pour former un matériau ternaire ou quaternaire, plusieurs phénomènes d'adsorption/désorption sont mis en jeu. Dans le cas usuel, les atomes V sont distribués aléatoirement ; sous certaines conditions des domaines riches en anions respectifs apparaissent. Il s'agit d'une séparation de phase qui apparaît lorsque le diagramme de phase présente un gap de miscibilité. C'est le cas de l'alliage  $GaAs_xSb_{1-x}$ , pour lequel le gap de miscibilité s'étend de  $x = 0.2$  à  $x = 0.8$  à  $600^\circ\text{C}$  (Li et al. 1998). La croissance épitaxiale des alliages III-AsSb a été l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux depuis les années 70. En effet, le comportement « atypique » des mécanismes de croissance est notamment lié aux jeux complexes d'adsorption/désorption de l'élément antimoine. Autant en phase solide (épitaxie par jets moléculaires - MBE) qu'en phase vapeur (épitaxie en phase vapeur par organométallique -MOVPE), de multiples paramètres de croissance (température, composition chimique et arrangement atomique à la surface du substrat, pression de vapeur des éléments, . . .) entrent en jeu dans la phase d'incorporation dans la phase solide. Les modèles atomistiques et thermodynamiques s'accordent sur des comportements fortement non-linéaires auxquels doivent s'accoutumer les épitaxieurs ! L'application visée dans le cadre de ma thèse et mon postdoc était la réalisation de miroirs de Bragg AlGaAsSb/AlAsSb ou AlGaAsSb/InP, susceptibles d'être intégrés au sein d'une structure VCSEL. L'avantage de ces matériaux réside dans le contraste d'indice important entre les couples d'alliages. Les propriétés structurales et électriques des hétérostructures sont elles fortement dépendantes de la maîtrise de leur croissance réalisées à partir de ces matériaux.

### 1.1.1 Cas de la MBE

Des travaux tels que (Harmand et al. 1997) ont montré les variations non-linéaires des diagrammes de composition des alliages III-AsSb, et notamment des modifications du coefficient de collage de l'antimoine sous l'influence de la surpression d'arsenic. Durant ma thèse au CEM2, nous avons observé ces mêmes comportements, et nous avons pu y pallier grâce à la maîtrise précise des flux ( $As$ ,  $As_2$ ) issues de la cellule à effusion antimoine à étage de craquage (Genty et al. 1999). Ce contrôle manquait cependant de fiabilité pour la fabrication de composants, ce qui nous a poussé à expérimenter une autre solution basée sur la mesure en surface des flux d'As et d'Sb adsorbés.

Pour s'affranchir de ces phénomènes, nous avons proposé de réaliser la croissance à faible rapport V/III, qui accessoirement confère l'avantage de pouvoir contrôler les compositions des éléments III et V directement par les oscillations RHEED. La figure 1.1 représente le contrôle des compositions As et Sb quelle que soit la composition en Al de l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ .

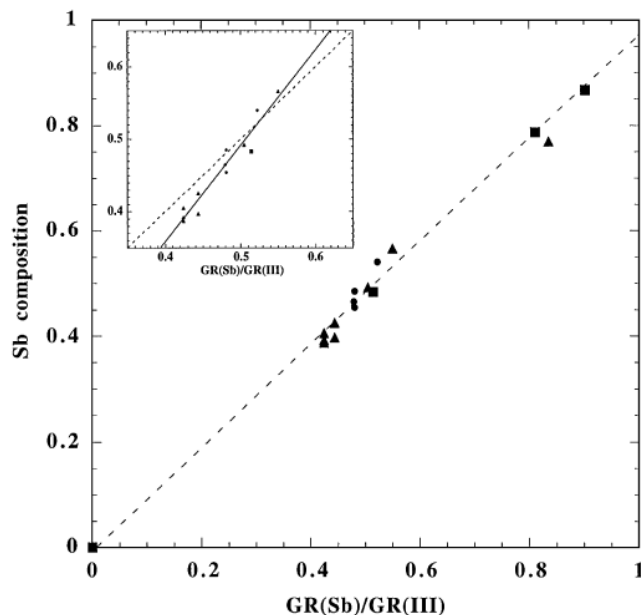


FIG. 1.1 – Maîtrise de la composition dans  $[Al, Ga]As_xSb_{1-x}$

Nous avons remarqué que cette méthode n'altère pas la qualité structurale et optique du matériau. La fabrication de miroirs de Bragg impose l'empilement de multiples couches avec des modifications de composition abruptes ou graduelles ; ces variations vont permettre de garantir des taux de réflexion optimaux à chaque interface. En considérant la conduction électrique de l'empilement, la formation de gradualités de l'énergie de bande interdite aux interfaces par modulation de la composition des alliages ou par l'introduction de super-réseaux, la résistance globale du miroir va être réduite, cependant avec une détérioration relative sur la réflectivité. Dans le cas de composés quaternaires tels que  $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ , en première approximation le paramètre  $y$  permet d'ajuster l'accord de maille, et  $x$  l'énergie de bande interdite et par conséquent l'indice de réfraction. Or, un léger changement de composition en Al impose une modification des flux d'arsenic et d'antimoine pour conserver l'accord de maille. L'emploi de pseudo-alliages plutôt que d'alliages uniformes permet de faciliter ces variations de composition. Nous avons ainsi utilisé la flexibilité des pseudo-alliages  $(AlAsSb)_x(GaAsSb)_{1-x}$  pour les variations graduelles aux interfaces des miroirs, ceci en conservant constantes les conditions de croissance et l'accord de maille pour chacun des deux ternaires (Almuneau et al. 2000b).

Ces méthodes de conception avaient été exploitées auparavant pour la croissance de VCSELs AlGaAs (Fritz et al. 1995), en les adaptant au système d'alliage plus complexe AlGaAsSb. Ainsi, nous avons démontré que les bonnes propriétés optiques des miroirs de Bragg AlGaAsSb/AlAsSb étaient compatibles avec une résistivité minimale des hétérostructures, avec une incidence directe sur les propriétés thermiques du VCSEL. Ce travail de fond en épitaxie a permis au laboratoire du Prof. Coldren, où j'ai réalisé mon postdoc sur ce thème (1999-2000), de réaliser des avancées notoires sur les VCSELs monolithiques à  $1,55 \mu\text{m}$  et  $1,3 \mu\text{m}$  (Hall et al.

(1999a), Nakagawa et al. (2001), Asano et al. (2003), Feezell et al. (2005a,b), Buell et al. (2006)).

### 1.1.2 Cas de la MOVPE

L'équilibre thermodynamique est le même dans le cas de l'épitaxie en phase vapeur, seules les fenêtres pour les conditions de croissance vont différer du fait des contraintes environnementales différentes. D'une part, la décomposition des espèces organo-métalliques (MOs) à l'approche de la surface, qui peut requérir des conditions de température élevées. D'autre part, l'aspect réactif entre les molécules durant la croissance peut être rédhibitoire dans le cas d'un mauvais choix des sources métalorganiques. Ainsi, le choix de la combinaison - géométrie du réacteur, sources MOs, pression, vitesse des gaz et température - est crucial dans le cas de ces matériaux arséniures-antimoniures.

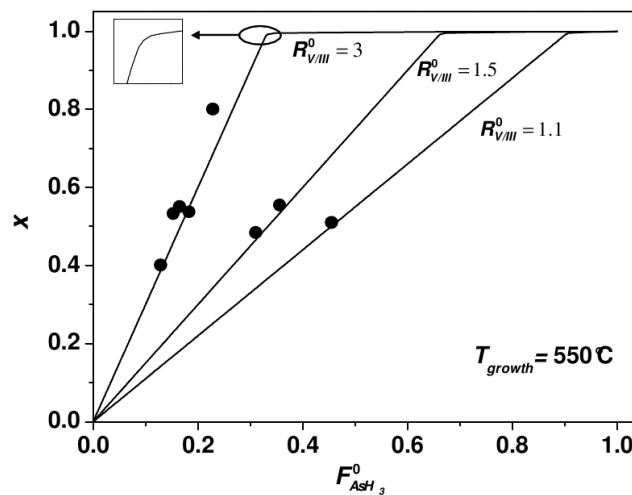


FIG. 1.2 – Relation entre la concentration de flux incident  $\text{AsH}_3$  et la concentration en As dans le solide. Les courbes calculées à l'équilibre solide-vapeur correspondantes aux différents rapport V/III sont tracées (Ostinelli 2006)

A nouveau, la croissance à faible rapport V/III amène certains avantages en MOVPE : une concentration faible d'antimoine résiduel dans le réacteur, une meilleure morphologie de surface et une dépendance linéaire solide-vapeur sur toute la gamme de composition, et ceci sans séparation de phase.

Dans l'étude menée au cours de la thèse d'Oivier Ostinelli (2002-2006) à l'ETH Zürich, dont j'ai assuré la direction scientifique avec le Prof. W. Baechtold, le but était d'épitaxier un empilement InP/AlGaAsSb, qui présente de meilleures propriétés électriques et thermiques par rapport à AlGaAsSb/AlAsSb (cf. chap. 1.3.1). Il s'agissait alors de réaliser des interfaces abruptes entre composés n'ayant aucun atome commun. Notamment, la ségrégation de l'antimoine est un facteur dont il est important de s'affranchir. Dans les conditions particulières de croissance MOVPE ( $T=580^\circ\text{C}$ , faible rapport V/III), on peut observer une accumulation en surface de Sb qui aboutit à des modifications notables des conditions de

croissance : changement des pressions partielles  $\Rightarrow$  décalage de l'équilibre solide-vapeur  $\Rightarrow$  modification de la dépendance composition solide / composition phase vapeur incidente. Le résultat de cette accumulation est une gradualité de la composition, une chute de la vitesse de croissance, et dans le cas d'hétérostructures une « pollution » des couches contigües. La solution retenue, restreinte par la fenêtre étroite des paramètres de croissance, a été d'élaborer une séquence particulière des flux à chaque interface (Ostinelli et al. 2006c). Ces séquences ont pu être développées à l'aide de la mesure in-situ par spectroscopie de réflexion anisotrope.

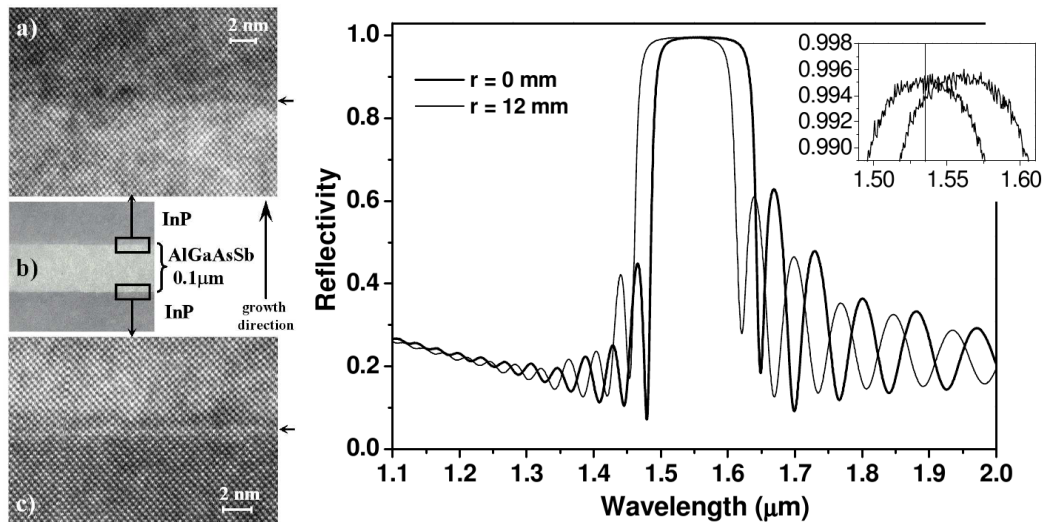


FIG. 1.3 – Microscopie électronique par transmission d'hétérostructures  $\text{InP}/\text{AlGaAsSb}/\text{InP}$  (E. Müller, ETHZ) (gauche), Réflectivité d'un DBR  $\text{InP}/\text{AlGaAsSb}$  24 périodes réalisé par MOVPE, au centre du wafer 2" et à 12 mm vers le bord (droite).

Cette étude a mené à la première fabrication MOVPE de miroirs de Bragg dopés de forte réflectivité (Ostinelli et al. (2004; 2006c)), et par suite à la réalisation d'une structure VCSEL complète dans le système III-AsSb (Ostinelli 2006).

La maîtrise de croissance du système  $\text{AlGaAsSb}$  au laboratoire FIRST de l'ETH, grâce à la thèse de O. Ostinelli, a donné lieu à d'autres applications pour ces matériaux. Des démonstrations ont été faites, durant et à la suite de cette thèse, sur des structures à absorbeur saturable (Grange et al. (2004; 2006)), et des transistors à double hétérostructures (Liu et al. (2007b;a; 2008)), dans les groupes respectifs du Prof. U. Keller et du Prof. C. Bolognesi de l'ETHZ. L'utilisation avant-gardiste de ces matériaux a ainsi permis de mettre à profit leurs propriétés originales pour la réalisation de composants à hautes performances.

## 1.2 AUTRES SYSTÈMES DE MATÉRIAUX CONTRAINTS POUR L'ÉMISSION IR

La section précédente était consacrée aux miroirs de Bragg qui composent le VCSEL. Dans le cadre de mon séjour postdoctoral à l'UCSB, j'ai aussi mené quelques études sur les zones à gain envisageables

pour une émission infrarouge. Précédemment, nos miroirs à base d'arséniures/antimoniures se basait sur le choix du substrat InP, en les conjuguant aux régions actives telles que InGaAsP ou AlGaInAs. L'autre approche, dans le but d'étendre la longueur d'onde vers l'infrarouge est de réaliser un matériau à gain de petit gap sur substrat GaAs. A priori, cette solution recevrait plus d'intérêt des industriels, du fait des acquis technologiques dans la filière AlGaAs, et la compatibilité avec les outils de production établis pour les VCSELs à 850 nm. De nouvelles conjugaisons entre éléments peuvent dans ce cadre être exploitées pour former des hétérostructures à gap réduit. Les approches que j'ai traitées sont d'une part les hétérostructures à raccordement de bandes décalées (Type II) tels que GaAsSb/InGaAs par MBE, AlGaAsSb/InP par MOVPE, et d'autre part les puits quantiques à base de GaInAsN/GaAs (Type I).

### 1.2.1 Hétérostructures GaAsSb / InGaAs

L'hétérostructure GaAsSb/InGaAs est un bon candidat pour l'émission à 1300 nm sur GaAs, puisque la bande de conduction de GaAsSb se positionne au centre du gap de InGaAs. Les désavantages de cette combinaison sont l'accumulation des contraintes en tension sur GaAs, et le faible recouvrement des fonctions d'onde des électrons et des trous au niveau des interfaces où se dérouleront les recombinaisons radiatives. J'ai effectué quelques essais sur ce système, durant mon postdoc, et démontré des propriétés de photoluminescence à température ambiante au delà de 1300 nm. Sous l'effet d'un champ électrique plus intense (pompage), la longueur d'onde d'émission tend à se décaler vers le bleu et l'efficacité décroît suite au remplissage des bandes par les porteurs et à l'accroissement de leur différence de vecteurs  $\vec{k}$  (Ryu et Dapkus 2002). Malgré les difficultés liées aux désaccords de maille, ce type de raccordement de bande retrouve un regain d'intérêt aujourd'hui. En effet, il permettrait de réaliser des jonctions tunnel de faible résistivité — comme suggéré par Esaki (Esaki et Stiles 1966) — applicables aux VCSELs (Suzuki et al. 2006) et aux cellules solaires « tandem » (Seidel et al. 2008).

### 1.2.2 Puits quantiques GaInAsN / GaAs

Le système alternatif GaInAsN/GaAs, utilisé comme puits quantiques, présente le double avantage d'être moins désaccordé en maille et de permettre une émission jusqu'à 1300 nm et même au delà. Il a été proposé par (Kondow et al. 1996) et a suscité un intérêt déterminant pour les études fondamentales et les applications en optoélectronique ces dernières années. J'ai étudié, lors de mes recherches à Avalon Photonics, l'épitaxie des ternaires GaAsN et GaInAsN sur GaAs par MOVPE, sur la base des nombreux travaux de la littérature (Hoehnsdorf et al. 1998) (Ougazzaden et al. 1999). Des études en photoluminescence résolues en temps réalisés par T. Taliercio du GES ont confirmé les effets de localisation dans la matrice InGaAsN et ce dès une faible incorporation d'azote (Intartaglia et al. 2005). Des progrès en épitaxie (MBE et MOVPE) ont permis de progresser en longueur d'onde, ceci en augmentant la limite d'incorporation du couple In/N dans le cristal sans induire de défauts non-radiatifs, grâce à l'utili-



sation de conditions d'épitaxie particulières ou à l'exploitation de l'effet de surfactant de l'antimoine sur GaAs. Cependant ces phénomènes singuliers de modification de la structure de bande restent une limite pour l'obtention de performances et de fiabilité dans les composants. Une autre voie proposée par (Shimizu et al. 2000) et (Ungaro et al. 1999), consiste à exploiter l'augmentation d'incorporation de N favorisée par la présence de Sb. Un record de décalage spectral des puits GaInNAsSb jusqu'à plus de 1550 nm a pu être ainsi démontré et récemment appliqué aux VCSELs (Sarmiento et al. 2009)

### 1.2.3 Hétérostructures AlGaAsSb / InP

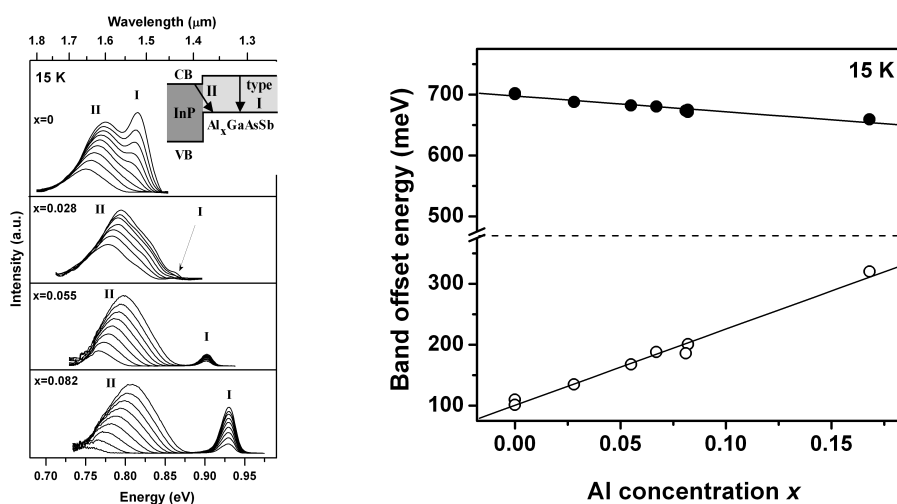


FIG. 1.4 – Caractérisation en photoluminescence de l'hétérostructure  $\text{InP}/\text{AlGaAsSb}$ , et mesures associées des décalages de bande

La dernière hétérostructure d'intérêt est l'association  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}/\text{InP}$ , avec un décalage des bandes se transférant entièrement sur la bande de valence. Nous avons étudié lors de la thèse de O. Ostinelli les propriétés de photoluminescence de ce système de matériaux. Une des propriétés particulière de cette hétérostructure est l'alignement des bandes de conduction, propriété que nous avons mise à profit pour réduire les résistances série des DBRs de type N. En dissociant les recombinaisons dans le quaternaire par rapport aux recombinaisons intrabande aux interfaces, nous avons pu déterminer les décalages de bande et leur variation en fonction de la concentration en aluminium (Ostinelli et al. 2006a). D'autre part cette hétérostructure a été étudiée au sein d'un miroir semiconducteur à absorbant saturable (SESAM) par photoluminescence basse température et par expérience d'excitation-sondage (réalisé dans le groupe du Prof. U. Keller). L'interface  $\text{InP}/\text{AlGaAsSb}$  et les recombinaisons type-II inhérentes induisent un allongement de la durée de vie des porteurs dans l'absorbeur. Cette transition lente peut par suite être anihilée en interposant une barrière d' $\text{AlAsSb}$ , élevée dans la bande de conduction, avec une réduction du temps de relaxation en deçà de 20 ps (Ostinelli et al. 2006b).

## 1.3 CONSIDÉRATION DES PROBLÉMATIQUES ÉLECTRIQUES ET THERMIQUES DANS LA CONCEPTION DES LW-VCSELs

### 1.3.1 Propriétés électriques et thermiques des DBRs

Les propriétés (impédances) thermiques en particulier furent longtemps problématiques pour les composants LW-VCSEL. En effet, du fait d'une part, du plus large potentiel électrique à appliquer à ces composants induisant un effet Joule plus marqué, et d'autre part, des mauvaises propriétés intrinsèques des matériaux utilisés, les performances des composants étaient largement affectées par les élévations de la température interne. Ces problèmes peuvent être minimisés en menant toutes les optimisations suivantes de front : bonnes propriétés des matériaux, limitation des phénomènes de génération thermique, dissipation et extraction de la chaleur par un montage optimal des composants. Toutes les structures de composants VCSEL émettant au delà de 1000 nm prennent en compte ces considérations. Cette ingénierie thermique a de plus amené récemment à une amélioration significative dans la progression des performances dynamiques des VCSELs Al-Omari et al. (2006), Fukatsu et al. (2008).

A noter, la suprématie sur ce plan du système AlAs/GaAs pour les DBRs qui présentent une conductivité thermique relativement élevée par rapport aux autres systèmes incluant des alliages ternaires ou quaternaires. La diversité d'éléments dans les alliages, et dans une moindre mesure la multiplicité des interfaces atténue la mobilité des phonons influent sur la conductivité thermique. D'autre part, les hétérojonctions dans les DBRs contribuent à une augmentation de la résistance électrique, d'autant plus que les différences d'énergie de bande interdite (et donc d'indice de réfraction) sont importantes. Pour y remédier, les interfaces graduelles largement utilisées pour AlGaAs ne permettent pas, selon le système de matériaux et le type de dopage, de réduire suffisamment ces résistances. Comme cité plus haut, l'hétérostructure InP/AlGaAsSb ne présente pas de discontinuité de bande pour le transport des électrons. J'ai proposé dans le cadre de mon postdoc, l'utilisation de cet empilement d'une part pour réduire l'influence des hétérojonctions N/N dans les DBRs, mais également pour le gain en conductivité thermique avec l'utilisation du binaire InP. Ce couple de matériaux n'altère pas non plus le contraste d'indice par rapport à AlGaAsSb/AlAsSb, et facilite quelque peu l'épitaxie. Certes, les performances se sont avérées toujours limitées par la résistivité du quaternaire, mais une amélioration a été mesurée par la méthode thermo-électrique  $3\omega$  (Almuneau et al. 2000a).

### 1.3.2 Intérêt de la jonction tunnel dite « Esaki »

Pour les miroirs III-AsSb de type P, la forte discontinuité au niveau des bandes de valence n'a pu être contournée (Hall et al. 1999b), et a orienté les recherches vers d'autres solutions qui s'en affranchissent.

Une première solution utilise une jonction tunnel (ou Esaki) placée au dessus de la jonction PIN, qui permet de « reconverter » les trous en électrons. Un miroir supérieur de type N peut ainsi être utilisé. Cette mise en cascade avait été proposée par van der Ziel (van der Ziel et Tsang 1982)

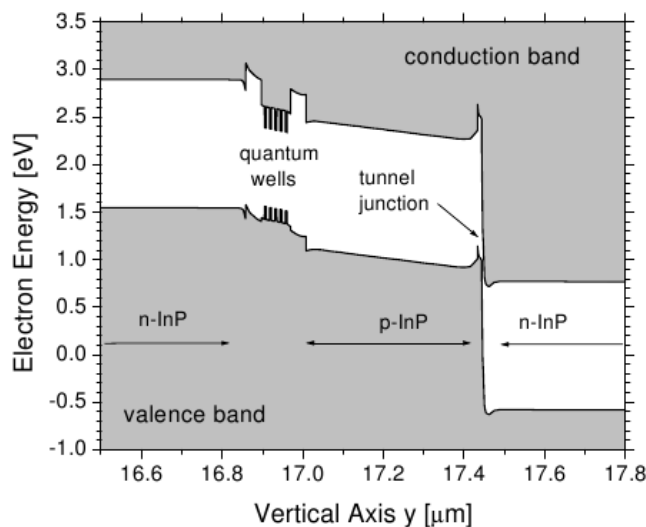


FIG. 1.5 – Diagramme de bande d'une région active sur InP intégrant une jonction tunnel

et par la suite adoptée pour empiler plusieurs zones de gain dans la cavité d'un VCSEL et d'obtenir des rendements quantiques supérieurs à 100% (Knodl et al. 2003). La combinaison entre zone active à jonction tunnel et miroir métamorphique (désaccordé en maille) a été étudié et mis au point avec succès par le groupe d'Alcatel/Opto+, en démontrant un VCSEL à 1,55  $\mu\text{m}$  avec une puissance record de 1 mW (Boucart et al. 1999).

Au cours de mon postdoc à l'UCSB, nous avons proposé et réalisé des structures VCSEL « unipolaires » à double miroir N, en insérant une jonction Esaki dans la cavité optique. Les zones de fort dopage permettent aussi d'augmenter la diffusion latérale des porteurs, ce qui nous a permis en partie d'atteindre le régime laser sous pompage électrique en régime pulsé (Hall et al. 1999a)

La tension appliquée aux bornes de ce type de dispositif dépend alors fortement du courant tunnel à faible polarisation. La résistance de la jonction polarisée en inverse peut être réduite en diminuant le gap des matériaux utilisés et en poussant le dopage pour obtenir des bandes fortement dégénérées. Ainsi les fonctions d'onde des trous et des électrons se recouvrent pour donner une conduction tunnel. Les hétérojonctions peuvent également permettre d'améliorer la conduction tunnel par rapport aux homojonctions, ceci en mettant à profit un décalage de bande favorable ( $E_c^{sc2} > E_c^{sc1} \geq E_v^{sc2}$ ) et compensant ainsi les bandes interdites larges des matériaux utilisés. Ces jonctions fortement dopées étant la source de pertes par porteurs libres, on peut réduire ainsi l'absorption de photons en utilisant des matériaux d'énergie  $E_g$  « transparente » et confiner cette jonction dans une zone où l'intensité du champ  $EM$  est minimale. L'hétérostructure  $\text{InP}(n^{++})/\text{AlInAs}(p^{++})$  nous a ainsi permis de réduire la résistance tunnel. Sur le même principe, comme cité plus haut, plusieurs propositions ont été faites sur GaAs, pour lequel les matériaux présentent un  $E_g$  plus grand (Zolper et al. (1994), Suzuki et al. (2006), Mars et al. (2004)). Cette solution est d'un grand recours, en particulier pour la progression des VCSELs vers des longueurs d'onde plus grandes dans l'in-

frarouge, mais également sur une nouvelle électronique intégrant cette ingénierie des bandes (par exemple avec InAs/AlSb : Schulman et Chow (2000)).

Afin de réduire le potentiel aux bornes du VCSEL, une autre solution consiste à limiter la jonction PIN aux bornes de la cavité optique : on parle de contacts intracavités. Cette géométrie implique inéluctablement un confinement latéral, afin de ramener les porteurs vers le centre actif du VCSEL. Ce confinement est réalisable par oxydation sélective latérale d'une couche AlGaAs riche en Aluminium (cf. chap. 2), mais aucune solution similaire n'est réellement adaptée pour les systèmes de matériaux sur InP. Nous avons opté pour une sous-gravure chimique sélective de la zone active du VCSEL, formée d'alliage InGaAlAs. Ce confinement efficace associé à la diffusion latérale accrue par la présence de la jonction tunnel permettait un meilleur recouvrement des porteurs avec le mode optique, de manière similaire au VCSEL à diaphragme d'oxyde. Les résultats ainsi obtenus sur ces VCSELs à intracavité et à diaphragme ont été spectaculaires, en termes de puissance, rendement, ceci jusqu'à près de 90°C (Nakagawa et al. 2001).

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'approche monolithique pour la fabrication de VCSELs à 1,3 et 1,55  $\mu\text{m}$  à base de matériaux antimoniures a démontré les potentialités intrinsèques de ce système de matériaux. Il est vrai que le savoir-faire de la croissance épitaxiale est un facteur déterminant. Dans ce chapitre, j'ai cependant voulu montrer que les deux techniques d'épitaxie, utilisées dans l'industrie, étaient utilisables pour réaliser des VCSELs performants dans la gamme 1,3-1,55  $\mu\text{m}$ . Malheureusement, ces résultats n'ont pas eu d'écho dans le monde industriel, peut-être dû au fait du contexte général du marché concernant ces sources LW-VCSEL. D'une part, l'approche concurrente axée sur GaAs avec des puits GaInAsN était certainement privilégiée par les acquis technologiques de cette famille de matériaux. D'autre part aucun marché n'a encore vraiment émergé après la récession des années 2000 pour les VCSELs infra-rouge.

A noter, que des approches que je désignerais comme « hybride » ont aujourd'hui des perspectives de développement les plus prometteuses : la technologie maîtrisée par Vertilas GmbH (jonction tunnel, filière AlGaInAs/InP) connaît aujourd'hui un certain succès grâce aux potentialités démontrées dans une large bande spectrale de 1300 nm jusqu'à 2300 nm, couvrant plusieurs types d'applications (liaisons optiques, détection de gaz). Ces applications de niche restent encore compatibles avec les coûts d'une technologie complexe et d'un imposant savoir-faire.

Concernant les matériaux antimoniures, d'autres applications en optoélectronique et en électronique ont vu le jour à la suite des progrès des techniques d'épitaxie. L'exemple des transistors à hétérostructure InP/GaAsSb a abouti à des fabrications dans un cadre de production industrielle sur wafer 4" (Intelligent Epitaxy Technology, IQE Inc., Picogiga), et des performances ouvrant vers l'électronique THz.



# TECHNOLOGIES DE CONFINEMENT : EXEMPLE DE L'OXYDATION THERMIQUE HUMIDE

## SOMMAIRE

2.1	INTÉRÊT ET ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE CONFINEMENT . . .	25
2.2	MAÎTRISE DU PROCÉDÉ DE L'OXYDATION SÉLECTIVE LATÉRALE .	27
2.2.1	Contrôle <i>in-situ</i> en temps réel de l'oxydation . . . . .	28
2.2.2	Sur la cinétique du procédé d'oxydation des alliages Al- GaAs à forte teneur en aluminium . . . . .	31
2.2.3	Etudes et démonstrations réalisées au LAAS . . . . .	34
2.3	DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ D'OXYDATION PAR LA SURFACE . . . . .	40
	CONCLUSION . . . . .	43

**D**ANS le but d'améliorer les performances actuelles des dispositifs à microcavité verticale, de diversifier leurs fonctions, et d'élargir la fenêtre spectrale de la filière GaAs, il faut lever les verrous actuels de la technologie de ces composants que sont la non-uniformité de l'injection électrique et la difficulté de contrôler précisément la forme et la dimension de la zone active imposés par les diaphragmes AlOx formés par oxydation latérale d'une couche d'AlAs enterrée. Depuis mon arrivée au LAAS, J'ai ainsi orienté mes recherches sur ces deux aspects. D'une part approfondir et développer les technologies existantes pour pousser à leurs limites de potentialités, ceci permettant d'aboutir de manière reproductible à des composants de performances données et largement améliorées. Je présenterai d'autre part le développement d'un nouveau procédé technologique original d'oxydation via la surface (PAIOx), qui offre la possibilité d'une structuration planaire, plus flexible, des indices optiques autour de la zone active. Cette technologie innovante, qui permet de dissocier l'ingénierie électrique et optique du fonctionnement de ces composants optoélectroniques, ouvre au développement de structures originales et sophistiquées

au comportement optique transverse contrôlé, ou encore à la maîtrise spatiale de l'injection électrique dans la zone active.

## 2.1 INTÉRÊT ET ÉVOLUTION DES MÉTHODES DE CONFINEMENT

De part sa géométrie, le confinement longitudinal (optique) dans un VCSEL est naturellement constitué par le fort pouvoir réflecteur des miroirs qui entourent la cavité. Le confinement latéral, *a contrario*, nécessite d'ajuster la conception de la structure, et ainsi une ou plusieurs opérations technologiques supplémentaires lors de la fabrication du composant. Le confinement latéral a de plus deux vocations dans le cas d'un composant à pompage électrique : le confinement électrique permettant de concentrer l'injection des porteurs dans une région préférentielle, et le confinement optique déterminant le nombre de modes guidés et leur propagation verticale dans la microcavité. Cette description ne considère pas les interactions thermo-électro-optiques qui impliquent une optimisation de la géométrie du composant, et particulièrement une grande maîtrise de la couche confinante et de son environnement. La règle générale d'ingénierie des confinements électriques et optiques dans un VCSEL vise l'obtention d'un recouvrement maximum entre les profils de la densité de porteurs injectés et du mode optique dans la région active. Dans le cas de volumes actifs réduits, les performances attendues du VCSEL deviennent optimales dans le cadre de nombreuses applications (faible seuil, rendement élevé, comportement monomode), mais malheureusement les effets latéraux (compétitions inter-modes, pertes optiques, de courant et de porteurs) deviennent prépondérants pour les diamètres d'intérêt en deçà de  $10\ \mu\text{m}$ . Pour des diamètres d'ouverture de diaphragme encore plus réduit, de l'ordre du micromètre, la réduction du nombre de Fresnel aboutit à de fortes pertes par diffraction (Hegblom et al. 1997).

Historiquement, le confinement latéral dans les VCSELs était constitué par une zone implantée, confinant efficacement l'injection électrique mais dont une des limitations est le guidage optique uniquement assuré par la formation d'une lentille thermique. L'obtention d'un faisceau gaussien résulte du gradient d'indice formé suite à la non-uniformité spatiale de l'injection électrique. Ce phénomène n'est plus efficace lorsque l'injection augmente, à cause des effets additifs de « hole burning ». De plus, le positionnement quelque peu à l'écart de la région active, afin d'éviter des problèmes de fiabilité et de pertes par porteurs libres, peut favoriser l'étalement latéral du courant sous les zones implantées. Récemment, le groupe de K. Choquette a proposé de pallier ces lacunes en adjoignant un confinement par l'indice au moyen de trous d'air dans le miroir supérieur (Leisher et al. 2006). Cette approche assure des résultats probants pour une émission monomode de puissance élevée, mais relève la complexité technologique du dispositif.

A noter, d'autres propositions pour un confinement électro-optique ont été faites s'inspirant de la technologie de reprise de croissance des lasers rubans (Gazula et al. 2005). Elle permettent une liberté plus grande dans la conception dans la dimension transverse des composants, mais souffrent également d'une fabrication plus complexe et donc coûteuse. Pour l'exemple des VCSELs à grande longueur d'onde, cette méthode de confinement est la seule à ce jour à parvenir à des performances satisfai-



santes ; de même dans la prospective d'un confinement plus raffiné pour des dispositifs de grande taille (projet EU FunFACS § 3.3.2).

La solution la plus globalement exploitée, et qui a prouvé le meilleur facteur de mérite *flexibilité / complexité technologique*, est le confinement par oxydation sélective d'une couche AlGaAs riche en Al, placée de manière judicieuse dans l'empilement. Elle est d'ailleurs la seule à avoir été adoptée unilatéralement par les fondeurs industriels. L'insertion au sein de l'empilement d'une telle couche structurée diélectrique/semiconductrice permet un confinement électrique des porteurs vers le centre du composant en éliminant les pertes par recombinaison en surface, mais elle permet également un confinement optique efficace et contrôlé par contraste d'indice entre oxyde ( $n=1.6$ ) et semiconducteur ( $n=3-3,5$ ). L'autre attrait de cette technique est dans sa localisation proche de la zone active et son épaisseur faible au sein du composant limitée à quelques dizaines de nanomètres en épaisseur, ce qui n'engendre pas de modification notable de la distribution des contraintes mécaniques, ni d'ajout excessif de « perturbations » ou autres pertes optiques. Le confinement par diaphragme d'oxyde (AlOx) permet ainsi de modifier et d'ajuster les performances électro-optiques statiques et dynamiques du VCSEL. Un attrait complémentaire est l'exploitation du contraste d'indice créé par exemple en micro-optique, et ce en privilégiant l'intégration au plus proche de l'émetteur.

Les hétérostructures  $GaAs/Al_xO_y$  ont notamment été une solution pour l'adaptation de phase pour la réalisation d'oscillateurs paramétriques optiques (OPO) (Fiore et al. 1998), et le guidage dans des structures à cristaux photoniques (Chow et al. 2000). D'autre part, l'application à la micro-optique intégrée a été démontrée en modérant la forte sélectivité par rapport à la composition d'aluminium dans les couches, et de former ainsi des microlentilles (Blum et al. (1996), Chang et al. (2006)). Ces différents aspects montrent bien l'intérêt en termes d'intégration que peut représenter l'AlOx.

L'utilisation du procédé d'oxydation thermique humide sélective est cependant restreinte au système d'alliage AlGaAs, réduisant ainsi ses potentialités d'exploitation dans d'autres gammes de longueur d'onde. Des études ont cependant été initiées sur InP (avec AlInAs) et GaSb (avec AlGaAsSb) mais n'ont jamais vraiment abouti à des réalisations pratiques. D'autre part une étude récente a révélé une absorption importante dans le moyen infra-rouge (Ravaro et al. 2008). Pour la gamme des courtes longueurs d'onde couverte par AlGaN, le groupe de N. Grandjean de l'EPFL a proposé une méthode originale d'oxydation du ternaire AlInN (Castiglia et al. 2007), qui constitue une avancée probante dans la réalisation, encore à venir, d'un VCSEL bleu pompé électriquement.

Comme cité plus haut, l'apparition récente de l'utilisation de cristaux photoniques (CP) au sein de composants VCSEL a connu un large engouement dans la communauté. Plus qu'un effet de bande interdite photonique, l'implémentation de trous d'air dans le miroir de Bragg supérieur permet un ajustement local de l'indice effectif. La distribution ainsi faite de l'indice dans la direction transverse permet de façonner le mode optique et sa propagation de manière similaire aux fibres à CP. Les applications

démonstrées de ce type de composant sont l'augmentation de la puissance d'émission monomode, et le couplage par la phase de composants voisins (Lehman et al. 2006) permettant la formation de matrice d'émetteur ou d'obliquer la direction du faisceau (Lehman et al. 2007). Il serait ainsi souhaitable de trouver une solution dérivée ne nécessitant pas la gravure profonde de nanostructures interférant avec le pompage électrique et les performances thermiques du composant.

## 2.2 MAÎTRISE DU PROCÉDÉ DE L'OXYDATION SÉLECTIVE LATÉRALE

Le contrôle précis de la dimension du diaphragme d'oxyde a une incidence directe sur les propriétés du VCSEL, en particulier pour obtenir des comportements monomodes nécessitant des diaphragmes étroits. Nous avons développé au LAAS un équipement permettant d'augmenter la reproductibilité de l'étape d'oxydation thermique humide sélective.

En effet, cette étape de fabrication est peu reproductible et nécessite une ou plusieurs étapes de calibration préliminaires. Ceci implique, dans un contexte de production de masse, de fortes pertes et un suivi particulier de cette étape du process. La figure 2.1 illustre un exemple de la dérive de la taille du diaphragme observé dans le cas d'une production de masse. En considérant qu'une déviation standard de  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  (pour un diaphragme de  $8\text{-}10 \mu\text{m}$ ) suffirait pour augmenter de manière suffisante la reproductibilité des performances des composants, on note que même une méthodologie de calibration régulière et donc assez lourde ne peut assurer d'un résultat fiable sur le contrôle du diaphragme. En effet, de multiples facteurs inhérents aux étapes préliminaires (épitaxie, état de surface, etc..) à l'oxydation peuvent affecter notablement la reproductibilité sur les dimensions du diaphragme.

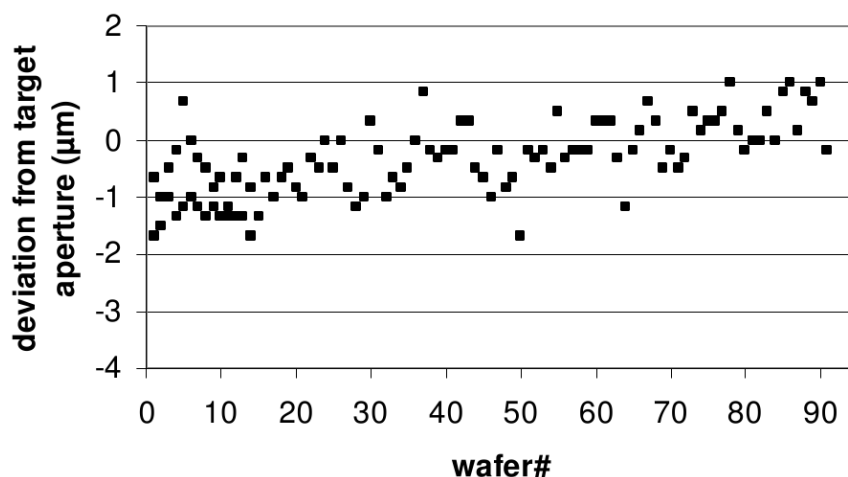


FIG. 2.1 – Variation de la taille de diaphragme sur plus de 90 wafers VCSELs en production (ULM Photonics). (Wiedenmann et al. 2006)

### 2.2.1 Contrôle *in-situ* en temps réel de l'oxydation

L'amélioration du procédé d'oxydation humide sélective latérale d'alliages à forte composition en aluminium est basée sur la stabilité et la maîtrise précise des multiples paramètres jouant sur la vitesse d'oxydation (température du four, dosage mélange eau-gaz, stabilité des flux). Nous avons, pour remplir ces critères, installé un nouveau système d'évaporation régulé afin d'injecter un flux de vapeur d'eau précisément déterminé dans le four d'oxydation porté à une température fixée dans la gamme 400-450°C. Ce travail a été conduit essentiellement par un stagiaire CNAM, P. Collière, en 2005-2006. Le nouveau système comprend un régulateur de débit liquide, un régulateur de débit massique pour le gaz vecteur et une chambre de mélange / évaporation régulée en température. Nous avons de plus développé une interface électronique capable de piloter tous les instruments et ainsi de définir des routines complexes lors du procédé d'oxydation. Ces évolutions ont abouti à une meilleure stabilité dans le temps des vitesses d'oxydation, et de fait un contrôle plus précis lors de la réalisation de composants (VCSELs et lasers rubans).

Cependant, le contrôle précis des paramètres du four peut ne pas suffire puisque d'une part des paramètres intrinsèques agissent sur la sélectivité de la réaction (concentration en Al) et la progression du front d'oxydation (épaisseur, état de surface initial, et autres propriétés intrinsèques jouant sur la diffusion), et d'autre part les dynamiques ne sont plus linéaires dans des cas géométriques particuliers (forme de la mesa circulaire/rectangulaire, diaphragmes de très petit diamètre).

Un autre volet de ce projet, qui a également été mené par un stagiaire CNAM (R. Bossuyt) en 2006-2007, a consisté à concevoir et élaborer une nouvelle géométrie de four compatible avec un suivi *in-situ* de l'oxydation par contrôle optique. Ce second volet a été soutenu par un financement de projet interne au LAAS (COMÉQ) pour une part, et d'autre part par le projet ANR jeunes chercheurs EELOT (2006-2009) que j'ai coordonné. Durant cette étude, nous avons démontré la faisabilité d'une observation en temps réel du front d'oxydation dans un VCSEL (Almuneau et al. 2008), ce qui constitue une avancée notable par rapport à la littérature (Feld et al. 1998). Le principe est basé sur la modification du spectre de réflectivité entre les zones oxydées et non-oxydées, qui nous permet de visualiser directement la propagation du front d'oxyde. Cette méthode fonctionnant dans le proche infra-rouge (700-1200 nm) permet en particulier de surmonter l'absorption des matériaux AlGaAs et la forte réflectivité du miroir de Bragg supérieur, afin de pouvoir observer la couche oxydée enterrée. Enfin, un microscope à fort grossissement donne accès à des dimensions d'ouverture de l'ordre du micromètre, permettant ainsi un contrôle suffisamment précis pour assurer la stabilité de l'oxydation d'une couche au sein des composants, et donc de garantir celle de leur performances.

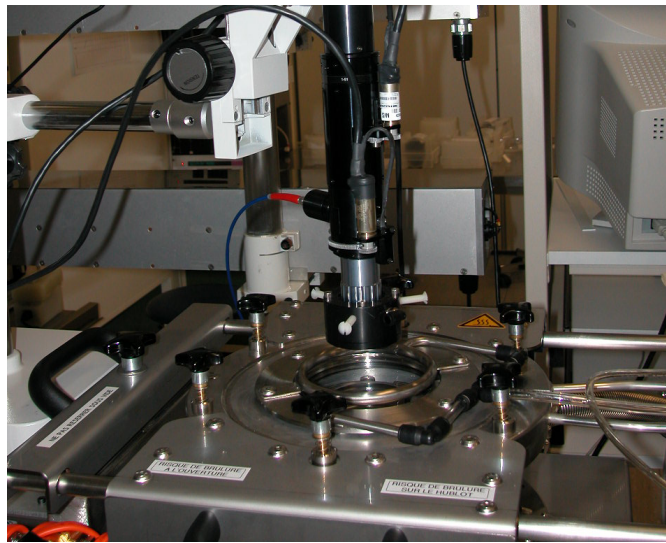


FIG. 2.2 – Four d'oxydation à géométrie horizontale pour l'observation *in – situ* en temps réel du procédé.

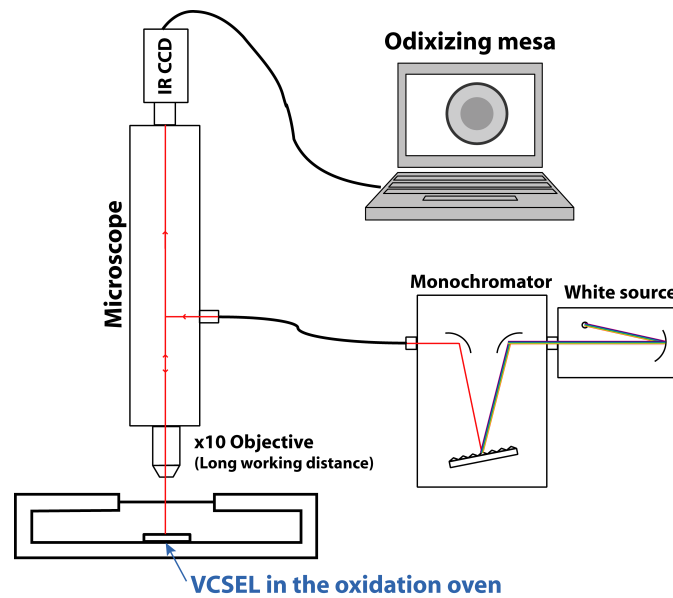


FIG. 2.3 – Schéma de principe de la mesure de réflectivité sélectionnée en longueur d'onde pour le contrôle *in – situ*

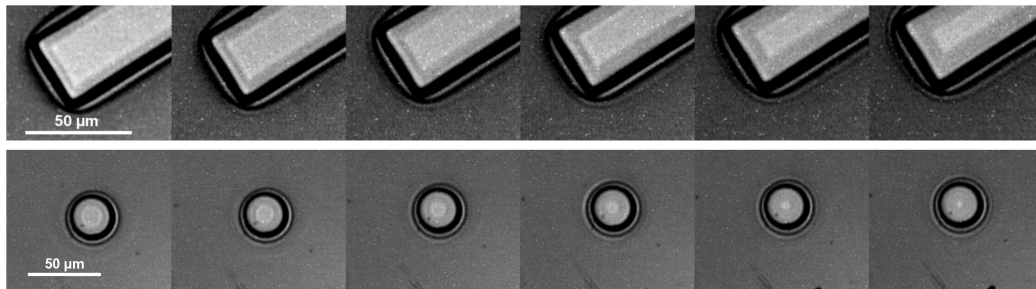


FIG. 2.4 – Observation en temps réel de l'oxydation latérale de la couche enterrée dans une structure VCSEL émettant à 850 nm dans le cas de mesas rectangulaire et circulaire. Le temps entre deux clichés consécutifs est de 1 min 30 sec.

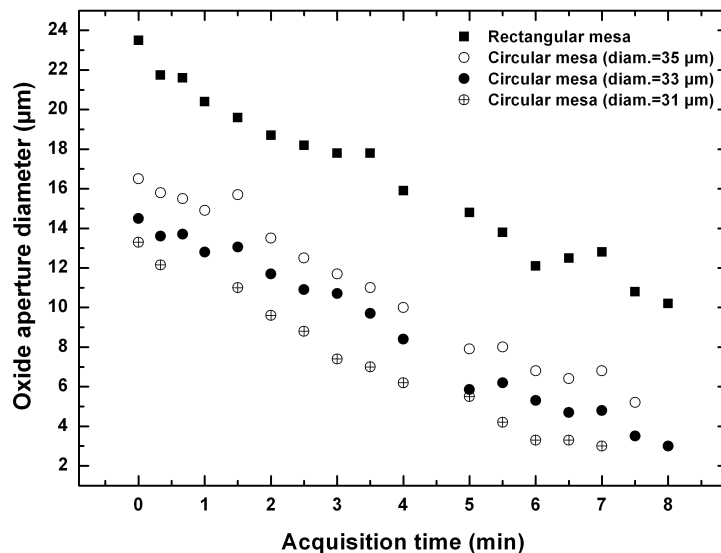


FIG. 2.5 – Evolution du diaphragme d'oxyde au cours du monitoring (cf. fig. 2.4) pour une mesa rectangulaire (largeur=41 μm) et trois autres circulaires (diamètres = 31, 33 et 35 μm).

Conjointement, un four dédié a été fabriqué par un sous-traitant (AET Technologies) sur la base d'un cahier des charges prenant en compte les contraintes d'une observation par microscopie de l'évolution du front d'oxydation en temps réel à l'intérieur du four. Cet équipement, qui vient compléter les moyens technologiques de la filière III-V de notre centrale de technologie (RTB), n'a pas d'équivalent aujourd'hui en Europe ; il est potentiellement valorisable auprès des industriels fabricants de VCSEL. Ces nouveaux outils technologiques performants, nous permettent maintenant d'étudier plus en détail les modèles théoriques de diffusion et d'oxydation de la littérature. Outre une meilleure compréhension des phénomènes et des différents paramètres mis en jeu, cette modélisation est un moyen complémentaire d'aide à la décision sur le procédé. Ces modèles, inspirés

de l'oxydation du silicium, ont été adaptés aux conditions particulières de l'oxydation humide des alliages AlGaAs (ou autres) et à l'influence des géométries des couches oxydées dans le cadre de leur utilisation pour des confinements électro-optiques de nos composants VCSEL.

### 2.2.2 Sur la cinétique du procédé d'oxydation des alliages AlGaAs à forte teneur en aluminium

Le procédé d'oxydation thermique humide dépend d'une multitude de paramètres qui ont trait à l'équipement utilisé, mais également à des facteurs liés à l'échantillon à oxyder. On peut citer en premier lieu la composition en Aluminium de la couche à oxyder : la maîtrise de ce paramètre, principal facteur de sélectivité de la réaction chimique, est relié aux conditions de croissance par épitaxie du matériau. D'après (Ku et Chang-Hasnain 2003), une fluctuation de  $\pm 0,5\%$  sur la composition de l'alliage  $Al_{0,98}Ga_{0,02}As$  entraîne une erreur de  $7 \mu m$  au bout d'une longueur d'oxydation de  $17,5 \mu m$ . Compte-tenu qu'une aussi faible variation de composition ne peut être décélée par les moyens de caractérisation classique (RHEED, Diffraction X, Photoluminescence), le procédé est alors incontrôlable.

La substitution des alliages homogènes  $Al_xGa_{1-x}As$  par des super-réseaux  $(AlAs)_x(GaAs)_{1-x}$  (pseudo-alliages) permet de contrôler par épitaxie de manière plus rigoureuse la composition. Des études ont été publiées dans ce sens montrant des propensions à l'oxydation équivalentes aux alliages homogènes. (Pickrell et al. 2000) et (Todt et al. 2002) ont toutefois observé une accélération de la vitesse de réaction dans les pseudo-alliages qui semble être corrélée à des processus de diffusion sensibles à l'environnement de la couche oxydée. Des comportements similaires ont été observés sur d'autres alliages tels que AlInAs sur InP (Hall et al. 2000).

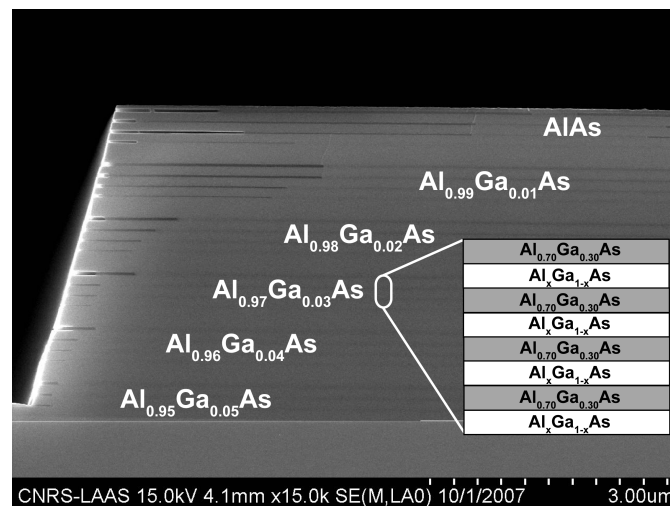


FIG. 2.6 – Photo au MEB d'une coupe de mesa oxydée. La structure consiste en une série de couches de pseudo-alliages  $(Al_{0,7}Ga_{0,3}As)_{n_1} / (AlAs)_{n_2}$  dont la composition et l'épaisseur varient par indentation.

Ce contrôle précis de la composition donne accès à des réalisations nécessitant des variations de profondeur d'oxydation progressives comme la

fabrication de lentilles intégrées (Chang et al. 2006), ou des fronts d'oxyde effilés (Naone et al. 1997), mais également à une meilleure reproductibilité du procédé (du moins par rapport à ce paramètre).

Cependant les origines physiques de cette modulation de la vitesse d'oxydation n'ont pas été précisément éclaircies. On peut trouver dans la littérature plusieurs cas où la constitution de l'hétérostructure, ou encore d'autres phénomènes physico-chimiques secondaires ont une influence sur le procédé d'oxydation :

- (Burton et Schlesinger 1994) relèvent des modifications de profondeur d'oxydation selon la géométrie des hétérostructures et hétérojonctions. Notamment les interfaces  $GaAs/Al_{0,8}Ga_{0,2}As$  favorisent l'étalement de l'oxydation de l' $Al_{0,8}Ga_{0,2}As$  par rapport à une interface  $GaAs/Al_{0,6}Ga_{0,2}As/Al_{0,8}Ga_{0,2}As$  dans laquelle  $Al_{0,6}Ga_{0,4}As$  ne s'oxyde pas, ce qui a été également observé par (Kim et al. 1996). Ces deux auteurs évoquent l'influence des contraintes comme facteur d'activation. D'autre part (Blum et al. 1997) propose que la diffusion dans la direction de croissance contribue à modifier légèrement l'oxydation latérale. Dans ce cas, l'hypothèse de la diffusion d'oxygène à travers les barrières ne peut que partiellement expliquer l'accroissement de la vitesse d'oxydation puisque la réaction chimique fait intervenir l'arsenic et l'hydrogène.
- L'épaisseur de la couche à oxyder joue un rôle en deçà d'une valeur critique, vraisemblablement fixée par le processus de diffusion dans la couche fine enterrée. La valeur communément admise de  $h_c \simeq 50 \text{ nm}$  peut sensiblement varier selon les conditions expérimentales. Considérant les applications du confinement dans les VCSELS, la réduction de pertes par diffraction requiert des épaisseurs inférieures à cette valeur critique  $h_c$ , ce qui rajoute une source d'incertitude pour la conduite du procédé. Comme je le présenterai par la suite, nous avons observé une diminution substantielle de  $h_c$  dans le cas de pseudo-alliages.
- La géométrie du motif à oxyder est également à considérer : un effet d'emballage de la vitesse d'oxydation a été prédit et observé sur les petits diamètres de diaphragme. La différence notable entre la vitesse d'oxydation des motifs linéaires et courbés est assez importante, de telle manière qu'une calibration réalisée sur flanc de méso rectiligne aboutira à une sur-oxydation dans une mesa circulaire dans le cas d'un VCSEL, différence d'autant plus importante que le temps d'oxydation sera long. Cet effet a été décrit comme étant purement géométrique par (Alonzo et al. 1998) et (Osinski et al. 2001) qui ont appliqué directement les équations de Deal et Grove dans un système de coordonnées cylindriques. Ils notent l'incidence du temps de process et de l'épaisseur des couches qui rendent l'évolution temporelle fortement non-linéaire dans ce cas particulier.
- (Langenfelder et al. 1997) présente un modèle exclusivement basé sur l'effet d'auto-obturation des pores sur la diffusion des espèces oxydantes à travers l' $Al_xO_y$  amorphe. Trois principaux processus dominant lors de l'oxydation thermique humide de l' $Al_xGa_{1-x}As$  : l'oxydation de l'Al et du Ga pour former un oxyde amorphe, la syn-

thèse et l'élimination d'As élémentaire ou d' $As_2O_3$ , et la cristallisation du film d'oxyde amorphe (Ashby et al. 1997).

Cette hypothèse est reprise par (Du et al. 2006) pour expliquer le rôle de l'hydrogène dans la dissociation des molécules  $As_2O_3$ , responsable des obturations des pores, sous forme d'espèces plus volatiles telles que l'arsine ( $AsH_3$ ). Cette dernière étude révèle une vitesse d'oxydation plus de vingt fois plus rapide dans le cas d'échantillons hydrogénés. Cette différence expliquerait les dispersions constatées entre l'oxydation d'échantillons épitaxiés par EJM et ceux par MOVPE (plus riche en H suite à une dissociation imparfaite des MOs et des hydrures)

- Enfin, un dernier aspect est la composition d'arsenic dans la couche ou à sa proximité. D'une part, et comme cité précédemment, l'évacuation de composés arséniés est importante dans les réactions chimiques. D'autre part, l'As interstitiel peut causer une détérioration des caractéristiques isolantes de l'oxyde avec une augmentation de sa constante diélectrique, ce qui est un facteur très limitant pour les applications micro- et optoélectroniques. (Laih et al. 2004) ont proposé de convertir cet inconvénient en avantage en utilisant les différences de cinétiques d'oxydation entre zones plus ou moins riches en As interstitiel. Au moyen d'une implantation d'ions  $As^+$ , l'augmentation de la dose implantée induit une accélération de l'oxydation. Cette constatation peut sembler contradictoire avec d'autres études (Ashby et al. 1997) préconisant l'évacuation de l'arsenic. Des observations similaires d'accélération de l'oxydation ont été faites sur des échantillons contenant une couche de GaAs épitaxié à basse température (LT-GaAs)(Reese et al. 1998), et ont révélé que la présence de défauts  $V_{Ga}$  et d'atomes d'arsenic interstitiels dans le cristal augmentait le coefficient de diffusion des produits arséniés dans les couches, facilitant ainsi leur évacuation. A noter que les VCSELs fabriqués par cette technique d'autorégulation de la vitesse d'oxydation par implantation présentaient des caractéristiques très similaires au composants oxydés avec la technique standard.

Cette énumération montre bien la difficulté à maîtriser ce procédé, particulièrement dans un contexte d'industrialisation. De multiples modèles ont été établis sur la base de chaque phénomène physico-chimique présumé, mais il n'existe à ce jour que des modèles prédictifs intégrant une composante empirique capable de s'accorder avec les résultats expérimentaux. Il semble donc que l'utilisation des techniques de contrôle en temps réel soit la solution la plus réaliste pour augmenter la reproductibilité du procédé. Une autre solution, comme celle précitée utilisant l'implantation ionique, est de réaliser par traitement préalable un contraste de vitesse d'oxydation sur la couche de confinement. Une approche visant ce même but, que nous avons proposée, est exposée par la suite (§ 2.3).



### 2.2.3 Etudes et démonstrations réalisées au LAAS

#### Cinétique d'oxydation au sein des hétérostructures : application aux pseudo-alliages

Concernant les cinétiques d'oxydation, nous avons réalisé récemment une étude exhaustive de l'oxydation de pseudo-alliages AlGaAs dans la gamme de composition ( $x = 0,95 - 1$ ) (Suarez et al. 2008). Ces alliages sont constitués de couches élémentaires alternées de  $n_1$  nm de  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  et de  $n_2$  nm d'AlAs, la concentration en Al étant fixée précisément en ajustant les épaisseurs respectives. Contrairement aux alliages homogènes, nous avons observé une incidence de l'épaisseur jusqu'en deçà de 20 nm (pour une valeur précédemment admise autour de 50 nm). Nous avons expliqué ce phénomène par la présence de canaux préférentiels d'oxydation que constituent les couches d'AlAs au sein des superréseaux, les couches de AlGaAs du superréseau jouant le rôle de barrière de diffusion (**notées BD dans la suite**). Deux mécanismes distingués par des énergies d'activation différentes ont effectivement pu être observés expérimentalement entre les pseudo-alliages ( $x = 0,95 - 0.98$ ), alliages presque homogènes et binaire ( $x = 0,99 - 1$ ).

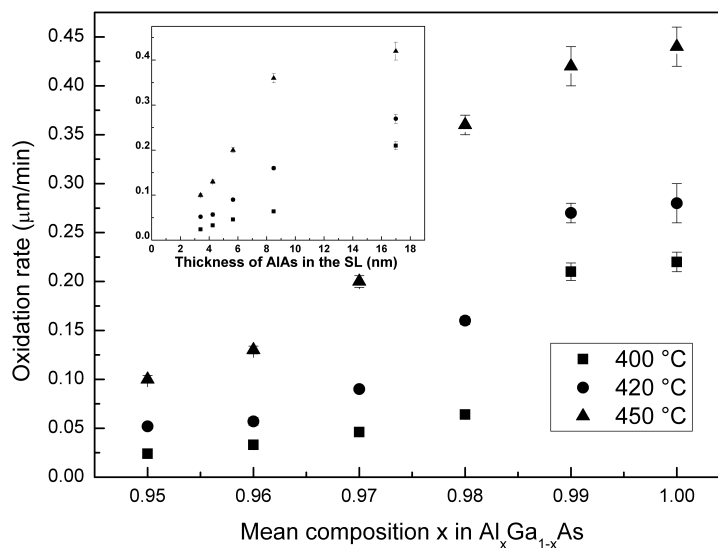


FIG. 2.7 – Dépendance de la vitesse d'oxydation par rapport à la concentration en Al des pseudo-alliages. Insert : même graphe en fonction des épaisseurs des couches unitaires d'AlAs utilisées dans le pseudo-alliage.

Il est bien connu que la profondeur d'oxydation pour un temps donné augmente avec la composition en Al de l'alliage, qui favorise la vitesse de réaction lorsque le processus n'est pas limité par la diffusion. Cette augmentation de la cinétique d'oxydation par rapport au taux d'aluminium semble d'après la figure 2.7 être exponentielle dans le cas des pseudo-alliages comme précédemment démontré pour les alliages massifs à (Choquette et al. 1997). Nous avons cependant observé un renforcement de

cette augmentation pour les pseudo-alliages à forte teneur en Al en fonction de la température d'oxydation, et noté une valeur critique de la composition au-delà de laquelle les profondeurs d'oxydation étaient fortement augmentées. Cette valeur critique s'abaisse lorsque la température de process augmente (cf. insert de la fig. 2.7). Notre hypothèse a été que, au-delà d'une certaine valeur d'Al, le ternaire se comportait comme une couche d'AlAs pur, avec une cinétique d'oxydation gouvernée préférentiellement par l'épaisseur des couches élémentaires d'AlAs constituant l'alliage. Comme semble l'illustrer l'insert de la figure à 2.7, le décalage de la composition critique en Al pourrait être corrélée à une élévation de la constante de diffusion dans le superréseau formant l'alliage, du fait de la variation de l'épaisseur minimum oxydable. Cette thèse était déjà avancée par (Todt et al. 2002) préconisant une oxydation canalisée dans les couches individuelles d'AlAs insérées dans les pseudo-alliages.

Ainsi, les fines couches oxydées se comportent en multicanaux pour l'avancée des réactants et l'évacuation des produits de la réaction, ceci résultant en une plus grande vitesse d'avancée du front d'oxydation par rapport aux alliages massifs. Nos données montrent que pour une température de 450°C, et au-delà d'une épaisseur unitaire d'AlAs de 8 nm, la vitesse d'oxydation atteint un régime de saturation.

Durant son postdoc au LAAS, I. Suarez a développé un modèle analytique capable de prendre en considération ces mécanismes (Suarez et al. 2008). Notamment il a pu reproduire l'influence de l'épaisseur des couches oxydées sur la vitesse d'oxydation. A l'aide de ce modèle et des nombreuses données expérimentales accumulées, nous avons pu montrer que l'épaisseur minimale pour qu'une couche soit latéralement oxydée pouvait être inférieure à 10 nm. Le modèle utilisé indique que ces épaisseurs très faibles pouvaient être oxydées latéralement grâce à une contribution pouvant provenir d'une accumulation de contraintes internes et/ou d'une évolution des voies de diffusion au cours de l'oxydation.

Selon la théorie de diffusion, la notion de dérive est l'effet de toute force externe pouvant modifier la distribution locale des concentrations. Dans le cas de l'oxydation d'AlGaAs, une dérive peut être considérée comme une modification de la vitesse d'oxydation pour des couches fines, du fait d'une augmentation des contraintes liées au changement volumique issu du changement de phase. Dans une publication récente (Suarez et al. 2009), nous expliquons la relation qui peut être établie entre une variation des contraintes et un terme de dérive ajoutée au modèle de l'oxydation d'AlGaAs (Ku et al. 2002). Les contraintes présentes au sein de l'hétérostructure oxydée sont générées par la contraction de volume occasionnée par l'oxydation. Une réduction de volume de 5-10% est couramment observée après oxydation. L'influence des contraintes internes a été observée et modélisée dans le cas de l'oxydation du silicium, qui se situe dans un régime viscoélastique, en liaison avec les hautes températures de process utilisées (Kao et al. 1988). Dans le cas de l'oxydation d'AlAs, à la température de l'ordre de 400-450°C, on se situe dans un régime élastique, ce qui rend plus difficile le calcul de distribution des contraintes. Dans le cas où les interfaces seraient rigides, elles seraient de  $10^{11}$  à  $10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ .

Ainsi plusieurs mécanismes entrent en jeu dans le cas d'hétérostructures, on peut les résumer en les identifiant comme suit :

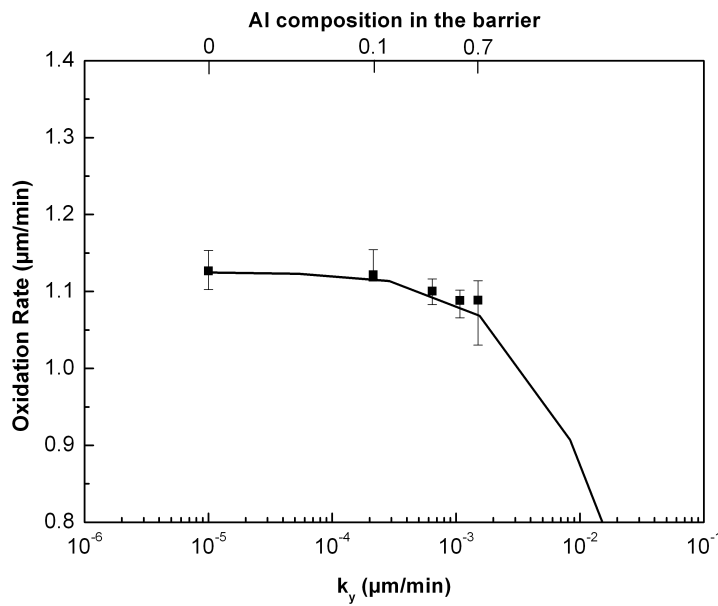


FIG. 2.8 – Modification de la profondeur d'oxydation due à la contribution verticale  $k_y$ . L'accord entre les données expérimentales et la courbe issue du modèle a été obtenu en reliant le coefficient explicitant la contribution verticale  $k_y$  à la composition en Al des barrières.

- l'oxydation procède en premier lieu dans les couches les plus riches en Al, dans AlAs, en admettant que l'oxydation de  $\text{Al}_{0,7}\text{GaAs}$  soit minime (estimé à moins de 1,5 nm/min)
- Comme l'oxydation se produit au sein des couches d'AlAs, une contribution verticale avec le flux entrant d' $\text{H}_2\text{O}$  ou sortant d'As (ou  $\text{AsH}_3$ ) agit sur les BDs. On considère alors que cette réaction secondaire est liée à leur composition en Al.
- Du fait de la faible vitesse de réaction, l'oxydation verticale des BDs ne sera prépondérante et ne se produira que sur toute l'épaisseur des BDs que pour une zone proche de la périphérie du méso oxydé. La complétion de cette oxydation de la BD en profondeur dépendra ensuite de son épaisseur.
- Même si les compositions des oxydes formés dans la couche AlAs et dans les BDs ternaires sont différentes, les oxydes sont poreux et contribuent à augmenter le transport de masse des espèces réactives et produites vers les couches les plus en profondeur d'AlAs non oxydé.

Ces effets sont inclus dans le modèle que nous avons développé pour l'oxydation de pseudo-alliages. Les figures 2.10 et 2.11, illustrent ces différents effets inclus dans le modèle applicables aux pseudo-alliages réalisés, où les paramètres variables sont respectivement l'épaisseur unitaire des couches AlAs, des BDs  $\text{AlGaAs}(x=0,7)$ , et enfin de la composition en Al dans les BDs AlGaAs.

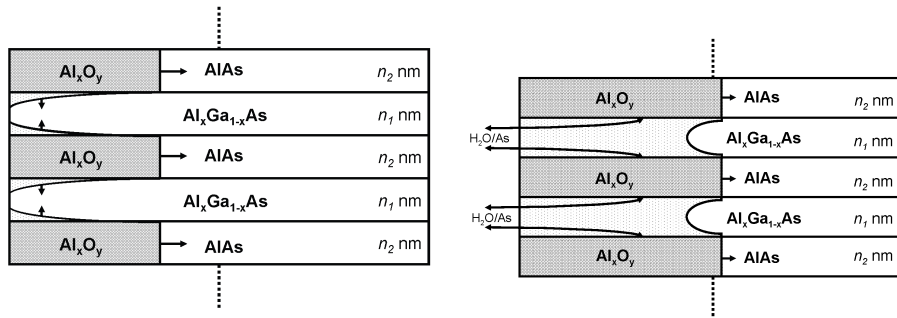


FIG. 2.9 – Modèle d'oxydation pour les pseudo-alliages : une réaction verticale s'amorce dans l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  (gauche) ; si l'épaisseur de cette barrière est assez fine, la couche est totalement oxydée et laisse des pores ouverts pour la diffusion de réactants  $H_2O$  et de produits de la réaction ( $As$ ,  $AsH_3$ ).

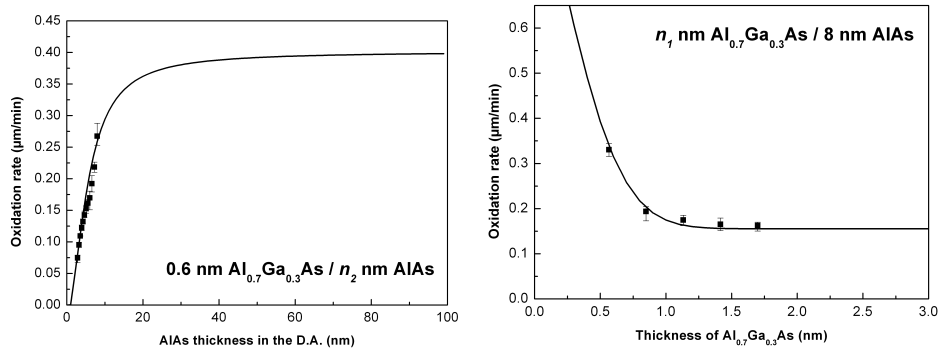


FIG. 2.10 – Vitesse d'oxydation par rapport à l'épaisseur respectivement des couches AlAs pour un pseudo-alliage  $0,6 \text{ nm} Al_{0,7}Ga_{0,3}As / n_2 \text{ nm} AlAs$  (gauche) et des couches  $Al_{0,7}Ga_{0,3}As$  pour un pseudo-alliage  $n_1 \text{ nm} Al_{0,7}Ga_{0,3}As / 8 \text{ nm} AlAs$  (droite). Les symboles correspondent aux données expérimentales et les lignes pleines au modèle simulé.

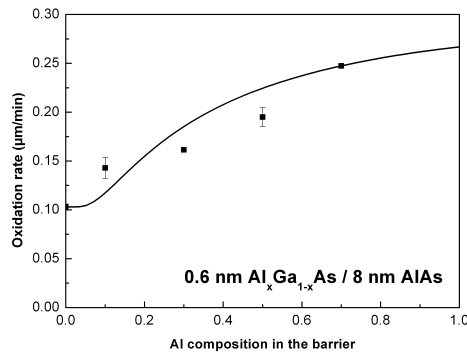


FIG. 2.11 – Vitesse d'oxydation par rapport à la composition en Al pour un pseudo-alliage :  $0,6 \text{ nm} Al_xGa_{1-x}As / 8 \text{ nm} AlAs$ .

### Cinétique d'oxydation au sein d'hétérostructures : contributions des couches contigües non oxydables

Ces résultats, obtenus sur des pseudo-alliages ont aussi identifié une contribution des BDs  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  sur l'oxydation des couches d'AlAs. Ces BDs, beaucoup moins riche en Al ne sont pas oxydées, mais leur épaisseur semble toutefois influencer sur la vitesse d'oxydation de l'AlAs voisine.

Nous avons étudié cet aspect en élaborant une multicouche qui permette de mettre en évidence les mécanismes de diffusion, qui influent à relativement faible échelle sur les profondeurs d'oxydation. Cette multicouche est composée de couches simples d'AlAs, dont l'épaisseur est égale à 50 nm, tandis qu'une couche de GaAs d'épaisseur variant entre 2 et 100 nm est insérée entre l'AlAs et la barrière habituelle épaisse d'alliage  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$ .

Couche	Epaisseur	Rôle
$Al_{0.7}Ga_{0.3}As$	100 nm	Cap
GaAs	[100, 50, 20, 10, 5, 2 nm]	Barrière
AlAs	50 nm	Couche à oxyder
GaAs	[100, 50, 20, 10, 5, 2 nm]	Barrière
$Al_{0.7}Ga_{0.3}As$	100 nm	Couche intermédiaire
GaAs		Substrat

Sur la figure 2.12, on voit clairement une différence de profondeur d'oxydation entre les différentes couches d'AlAs qui sont pourtant identiques en épaisseur. Des observations similaires ont été mentionnées dans la littérature uniquement dans le cas où l'oxydation s'étend dans les couches voisines plus riches en aluminium (Blum et al. 1997). Notre cas est fondamentalement différent puisque ces couches voisines ne s'oxydent pas ou peu, pointant vers une contribution liée à la diffusion de certaines espèces depuis ou vers ces barrières en GaAs/ $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  (100 nm).

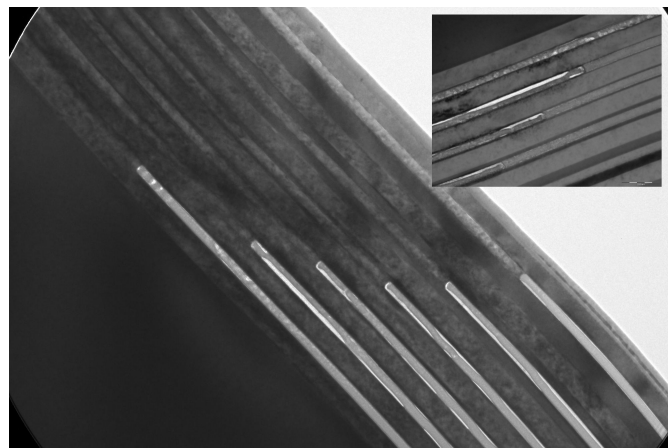


FIG. 2.12 – Image de l'échantillon réalisée par microscopie électronique en Transmission (MET) (collab. P.F. Fazzini LAAS/CEMES)

La cinétique d'oxydation de ces hétérostructures semblent donc être similaire aux pseudo-alliages décrits précédemment. Cependant les mécanismes physiques à l'origine de ces différences de profondeur d'oxydation restent complexes à identifier. Nous avons procédé sur cet échantillon à

une analyse SIMS, ceci afin d'identifier les éléments diffusants et s'il y a lieu les ségrégations au niveau des interfaces suite à l'oxydation.

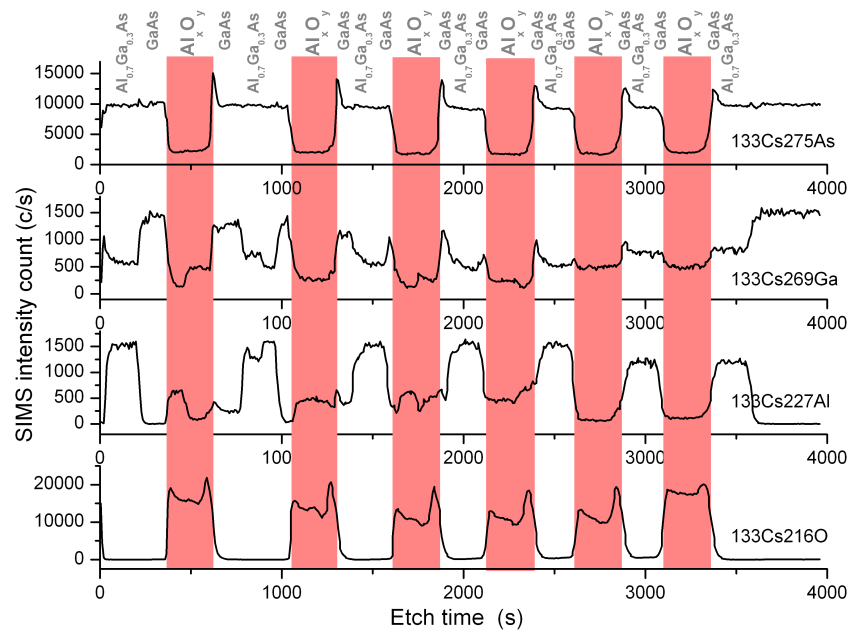


FIG. 2.13 – Profil de composition obtenu par spectrométrie de masses d'ions secondaires (SIMS) des différents éléments atomiques présents dans la structure oxydée

L'analyse de la figure 2.13 indique des accumulations d'arsenic aux interfaces  $\text{AlO}_x/\text{GaAs}$ , ainsi que des perturbations couplées des compositions en Ga et Al au sein des couches  $\text{AlO}_x$  et  $\text{AlGaAs}$ . Le profil d'oxygène montre également, de manière similaire à la distribution d'As, des accumulations aux interfaces  $\text{GaAs}/\text{AlO}_x$  et  $\text{AlO}_x/\text{GaAs}$ . Cependant, la précision de la mesure ne permet pas d'affirmer qu'une diffusion de l'oxygène se produit vers le GaAs et l' $\text{AlGaAs}$  et/ou que ces matériaux soient oxydés. D'autant plus que des effets de matrice peuvent être présents dans cette technique. Des clichés détaillés pris au MET montrent des étalements croissants sous forme de taches noires au fur et à mesure que les barrières de GaAs rétrécissent. Ainsi, ces observations nous permettent de désigner les diffusions d'As et d'O comme probables responsables des variations de profondeur d'oxydation. Nous avons également avec ces données expérimentales, la confirmation de la validité du modèle récemment proposé (Suarez et al. 2009) qui est exposé plus haut (cf. fig. 2.8).

Le principal résultat de cette étude est la mise en évidence de contributions secondaires (par rapport à celle du taux d'Al) lors de l'oxydation thermique humide d' $\text{AlGaAs}$ , qui présentent l'avantage de permettre une maîtrise plus fine des gradients de vitesse d'oxydation, par l'utilisation de multicouches de géométrie adéquate. Ceci ouvre la voie à la réalisation d'interfaces finales oxyde/semiconducteur de forme façonnable et modulable exploitables par exemple pour l'optique diffractive ou réfractive.

### 2.3 DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU PROCÉDÉ D'OXYDATION PAR LA SURFACE

Ce nouveau procédé consiste à contrôler l'oxydation de l'AlAs ou d'Al-GaAs à travers une couche de GaAs superficielle, dont l'épaisseur ( $d_1$  sur la figure 2.14) est ajustée pour assurer la diffusion à partir de la surface des espèces oxydantes jusqu'à la couche à oxyder. J'ai pris en charge, depuis mon arrivée au LAAS, le développement de cette nouvelle méthode d'oxydation (Almuneau et al. 2006) nommée "PAIOx" pour « Planar Aluminium oxidation ». Les expériences ont montré que, via un mécanisme de diffusion des espèces entrant en jeu dans la réaction d'oxydation à travers la couche superficielle, il est possible de contrôler l'oxydation d'une couche riche en aluminium sous-jacente. Ainsi, par simple masquage (dépôt masque diélectrique ou métal puis par procédé photolithographique), on peut localiser les zones à oxyder à partir de la surface. Les formes oxydées dépendent donc seulement du masque utilisé.

Cette méthode innovante d'oxydation par diffusion à travers une couche non oxydée permettrait donc, pour un composant, de confiner le courant à travers des motifs de forme libre, contrairement aux VCSELs qui ont un oxyde en diaphragme dont la forme est imposée par celle de la méso.

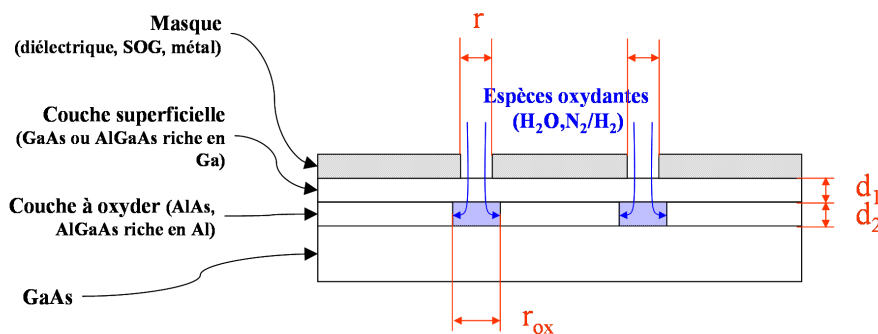


FIG. 2.14 – Schéma de principe de l'oxydation via la surface

L'oxydation au travers d'une couche cristalline (GaAs) en surface de qualité épitaxiale doit être réalisée par diffusion des espèces oxydantes ; aussi pour que ce mécanisme soit envisageable, il faut créer des défauts intentionnellement par dopage, implantation de la surface, ou encore par des conditions de croissance particulières de la couche superficielle. En se basant sur un procédé lithographique, le but est de reproduire les dimensions et formes des motifs d'un masque. Nous avons choisi d'utiliser la gravure ICP-RIE (Inductively coupled plasma reactive ion etching) comme moyen de création de défauts à proximité de la surface. En effet, cette technique, utilisée sur une surface recouverte d'un masque, ne créera de défauts que dans les régions non protégées. Le masque pourra être enlevé avant l'oxydation locale de la couche AlAs enterrée. Les conditions de gravure choisies visent à minimiser la gravure du GaAs tout en créant la densité de défauts requise pour la diffusion des espèces gazeuses lors de l'oxydation (stage DEA de Souad Moundji). Ces conditions sont particulièrement difficiles à obtenir car le GaAs en surface ne doit surtout

pas être totalement éliminé pour envisager une reprise de croissance et l'exploitation dans des composants (Amat et al. 2007). De plus, le phénomène d'oxydation humide étant régi par des mécanismes de diffusion, phénomène isotrope, l'étalement latéral dans la zone sans défauts est à considérer dans notre procédé. En effet, la maîtrise de cet étalement permet de contrôler la taille des zones oxydées et donc précisément celle de la géométrie de la zone active. Les tailles peuvent être avantageusement réduites, point qui était irréalizable par la technologie d'oxydation latérale AlOx.

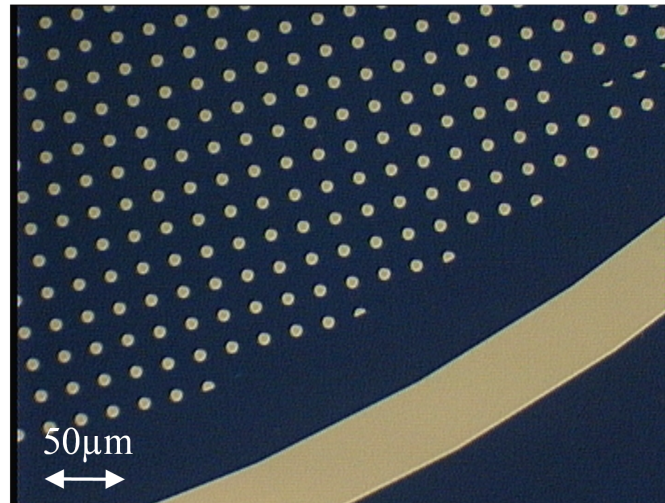


FIG. 2.15 – Application du procédé PAIOx : Motifs oxydés par la surface de l'échantillon (zone oxydée bleutée, et non-oxydée beige)

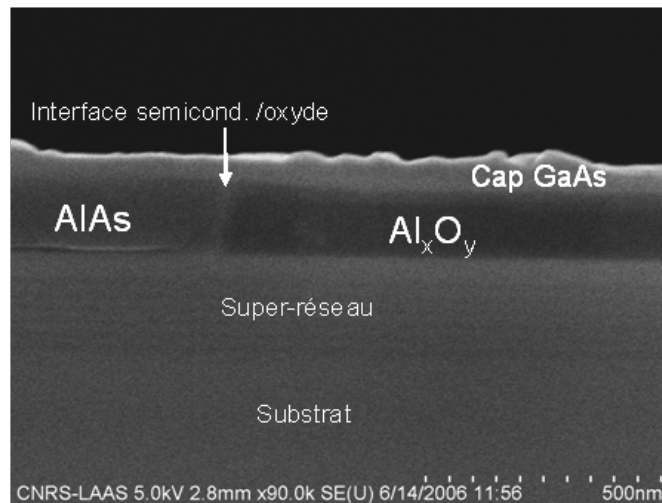


FIG. 2.16 – Image MEB de la coupe de l'échantillon oxydé autour de l'interface semiconducteur/oxyde

Nous avons également montré que cette oxydation permet la formation d'un isolant enterré sous une couche supérieure GaAs qui reste cristalline. Une reprise d'épitaxie est ainsi potentiellement réalisable. Cette étude a été menée dans le cadre de la thèse de Moustapha Condé. Ces



premiers résultats encourageants nous ont permis d'appliquer cette méthode à un composant -une LED- afin de montrer les capacités de cette technologie pour la localisation de l'injection électrique. Cette problématique de la maîtrise de la distribution des porteurs injectés est centrale pour les VCSELs à grand diamètre. Concernant le projet européen FunFACS (Fundamental Functionalities and Applications of Cavity Solitons), dans lequel notre équipe a été impliquée, la nécessité de contrôler la distribution de porteurs dans des cavités optiques de grande surface est une condition fondamentale pour la génération et la manipulation de solitons. Les résultats montrent que cette localisation est possible et applicable à toute géométrie en utilisant notre nouvelle méthode d'oxydation.

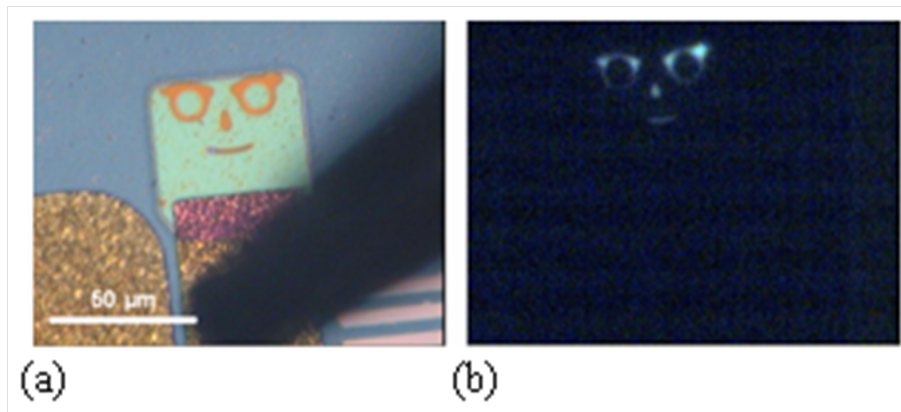


FIG. 2.17 – Vue de la surface de la LED réalisée par la technique PAIOx. (a) Test sous pointe au travers d'un contact ITO. (b) Electroluminescence localisée dans les zones non-oxydées transférées.

La compréhension et la modélisation de ce phénomène est également à l'étude. Nous nous basons sur des caractérisations et analyses structurales de nos échantillons telles que le MET, XPS, SIMS pour identifier les propriétés de l'oxyde et des couches semiconductrices contiguës.

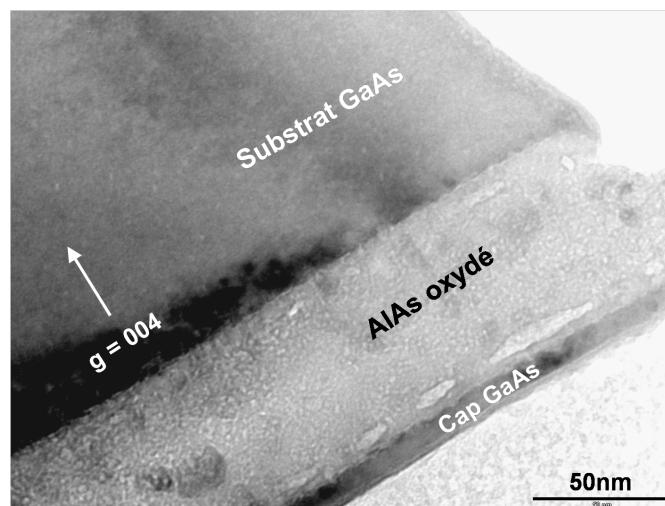


FIG. 2.18 – Vue en coupe par MET de l'empilement AlOx/GaAs

Pour l'échantillon oxydé, l'analyse SIMS montre une diminution nette du niveau de l'arsenic et une présence quasi constante d'oxygène dans la

couche d'AlAs indiquant ainsi une oxydation complète de celle-ci. Une caractérisation structurale par microscopie électronique en transmission (MET) permet d'autre part de confirmer que le GaAs en surface reste cristallin. Ce qui ouvre la voie à des perspectives très prometteuses comme la faisabilité d'une reprise de croissance par épitaxie, étape que nous abordons actuellement. La faisabilité d'une reprise d'épitaxie est maintenant l'un des objectifs de cette nouvelle technologie puisqu'elle permettra de compléter la structure verticale d'un composant. Sa réussite donnerait de plus accès à une structuration tridimensionnelle du composant et donc à une amélioration des performances de structures de composants existantes, et surtout d'innovation vers des géométries plus complexes.

## CONCLUSION DU CHAPITRE

Les différentes démonstrations sur l'instrumentation et la compréhension des phénomènes physico-chimiques du procédé d'oxydation que nous avons obtenues ces dernières années, convergent vers une amélioration et une stabilisation des performances des composants notamment des VCSELs. Ces recherches amont sur ces matériaux ont, dans le groupe, permis d'orienter nos projets vers la conception et le développement de fonctionnalités complexes au sein des composants, mais également pour l'implantation de nouvelles technologies sur les VCSELs. Ce dernier exemple est illustré par le projet Miopy initié par Véronique Bardinal en technologie polymères et la réalisation d'éléments micro-optiques intégrés (Bardinal et al. 2007). Également des évolutions notables des géométries de composants à base de microcavités nous permettent d'envisager des technologies incluant plusieurs diaphragmes de confinement (BiVCSEL) ou encore la fabrication technologique d'un VCSEL à miroir diffractant, à partir d'une bicouche de haut/bas indices recouvrant la couche active du composant, pour remplacer le miroir de Bragg supérieur. Ces aspects seront traités dans le dernier chapitre.

Grâce à une nouvelle méthode d'application du procédé d'oxydation, via la surface, une évolution vers un confinement tridimensionnel est rendue possible. La réalisation d'une reprise d'épitaxie sur les échantillons oxydés reste cependant à démontrer pour un transfert vers les composants. Ce travail devrait faire l'objet d'une prochaine thèse. Chantal Fontaine mène des travaux dans ce cadre, sur la structuration et préparation de surface, et la reprise d'épitaxie. Les récents progrès démontrés nous permettent d'envisager avec optimisme la réussite de ce projet (Desplats et al. 2009).

Dans le but de comprendre et de transférer le confinement par oxydation sur les VCSELs infrarouge à base d'antimoniures, des collaborations ont récemment débuté avec l'IES de Montpellier, pour la fenêtre d'émission 2-3 $\mu\text{m}$  (filière AlGaAsSb/GaSb), et l'INSA de Rennes dans la gamme 1.3-1.55 $\mu\text{m}$  (filière AlGaAsSb/InP). Ces études visent à comprendre et adapter l'oxydation de matériaux de ces filières riches en Al afin d'obtenir un confinement efficace sur substrats InP et GaSb.



# NOUVELLES FONCTIONNALITÉS INTÉGRÉES POUR LES LASERS À CAVITÉ VERTICALE

## SOMMAIRE

3.1	LE VCSEL À CAVITÉS COUPLÉES . . . . .	47
3.1.1	Contexte . . . . .	47
3.1.2	Composant BiVCSEL : pour la génération d'un rayonne- ment térahertz par photomélangé . . . . .	49
3.2	EXPLOITATION ET GUIDAGE DU SIGNAL LATÉRAL . . . . .	53
3.2.1	Intérêt . . . . .	53
3.2.2	Travaux menés au LAAS . . . . .	55
3.2.3	Perspectives . . . . .	56
3.3	FUNFACS . . . . .	57
3.3.1	Contexte . . . . .	57
3.3.2	Application aux solitons de cavité . . . . .	57
3.4	MIROIR À RÉSEAU DIFFRACTANT SUB-LONGUEUR D'ONDE À BASE D'ALOX . . . . .	60
3.4.1	Principes et contexte . . . . .	60
3.4.2	Exploitation de la technologie AlOx . . . . .	61
	CONCLUSION . . . . .	65

**O**UTRE le développement d'émetteurs performants, auquel j'ai participé tout au long de mon parcours, la recherche de nouvelles fonctionnalités et l'application de fonctionnalités complémentaires suscitent de nombreux travaux de recherche. Dans ce cadre, de nouvelles géométries de composants ou des procédés technologiques innovants, destinés à améliorer les performances, à lever les verrous rencontrés, ou à accroître leur intégrabilité sont développés.

Aujourd'hui, pour ces composants VCSELs on observe un changement dans la nature des problèmes soulevés. De nouveaux défis sont posés, particulièrement l'exploitation de la flexibilité de leur géométrie et les phénomènes physiques qui y sont liés. Citons l'accordabilité (pour les applications Coarse WDM), l'amélioration ultime de leurs performances, ou

l'ouverture à d'autres longueurs d'onde ; notamment suite à l'ouverture des champs d'applications de ce type de composants, en particulier vers l'instrumentation et les capteurs. L'innovation vient aussi des nouveaux concepts de la physique en cours d'épanouissement comme le laser à solitons ou à polaritons, la source à photons uniques, l'émission térahertz, qui peuvent tirer un grand parti de la possibilité essentielle des structures à microcavité : confiner efficacement la lumière et exalter l'interaction onde-matière.

Au LAAS, notre équipe travaille déjà depuis quelques années dans ce but d'une diversification et combinaison de fonctionnalités électro-optiques au sein d'un même composant. Des démonstrateurs ont été obtenus notamment sur les composants duaux intégrés émetteur-détecteur. Nous travaillons aussi sur les nouveaux concepts implémentables aux VCSELS avec les potentialités offertes par les cristaux photoniques. Les démonstrations visées se veulent génériques en s'appuyant sur la filière AlGaAs et les procédés technologiques présentés dans le chapitre précédent, mais sont en cours d'extension vers d'autres matériaux semiconducteurs, en particulier les antimoniures en collaboration avec l'IES Montpellier.

Dans ce cadre je vais développer quelques travaux marquants déjà effectués et sur lesquels je compte inscrire mon action dans le futur.

## 3.1 LE VCSEL À CAVITÉS COUPLÉES

### 3.1.1 Contexte

Les cavités couplées clivées ( $C^3$ ) se sont avérées très prometteuses car permettant d'accéder à une multitude d'interactions entre les différents modes spectraux en présence. En effet, à partir de cet unique composant, une multitude de fonctionnalités deviennent accessibles : fonctionnement strictement monomode du laser, accordabilité en longueur d'onde, basculement rapide, ou encore génération d'impulsions courtes via le blocage de mode et "Q-switching". Ce nouveau type d'émetteur suscite actuellement de nombreux travaux pour l'intégration monolithique par l'implémentation des cristaux photoniques dans les cavités planaires. Ces évolutions, suite aux progrès des technologies des semiconducteurs pour la photonique, sont advenues parallèlement pour les VCSELs. Ainsi, certains groupes ont pu démontrer dès le milieu des années 1990, à partir de structures à microcavité intégrant plusieurs cavités, de nouvelles potentialités d'application citées plus haut. L'aspect monolithique de ce type de composant est d'un grand intérêt pour un meilleur couplage optique, électrique et thermique, donnant lieu à des caractéristiques mieux maîtrisées et stables, tout en offrant une accordabilité. L'aboutissement de ces résonateurs couplés est évidemment corrélé aux nouveaux développements technologiques. Les VCSELs à cavités couplées (CC-VCSELs) soulèvent en premier lieu les problèmes d'épitaxie d'une telle structure très épaisse. Aujourd'hui cette difficulté peut être surmontée grâce aux améliorations des performances en termes de stabilité et d'uniformité des bâtis d'épitaxie, autant en MBE qu'en MOVPE de développement et de production (Choquette et Hou 1997). La fabrication de composants CC-VCSEL reste cependant restreint à certains groupes de recherche : EPFL / Avalon Photonics, Univ. Illinois / Sandia Albuquerque, Ulm Univ. et plus récemment le LPN / ENS. Les premiers résultats sur les microcavités couplées verticalement datent de 1994 par (Stanley et al. 1994) qui obtiennent un couplage fort photon-exciton propice à l'existence de polaritons de cavité. Le couplage entre les cavités est identifié par l'important effet d'anti-croisement entre les modes longitudinaux. Par la suite, des émetteurs CC-VCSELs actifs sont réalisées par l'EPFL (Pellandini et al. (1997), Carlin et al. (1999), Brunner et al. (2000)) avec la démonstration d'une émission bimodale. Des comportements liés à la compétition modale intercavité sont ainsi observés qui donnent lieu à différents régimes d'émission (Badilita et al. 2004). Le groupe de Choquette étudie ce composant depuis les années 2000, et a démontré un vaste panel de nouvelles applications et améliorations de performances grâce à ce composant. Dans (Fischer et al. 1999), l'émission issue d'une cavité est modulée par une cavité passive par électroabsorption ou variation de l'indice selon le signe du potentiel aux bornes de cette dernière. Cette fonctionnalité pointe vers des composants à modulation externe offrant une bande passante étendue, ou vers l'intégration d'un absorbeur saturable. Très récemment (Genevet et al. 2008) ont montré expérimentalement l'intérêt de cette configuration pour la génération de solitons de cavité. L'observation de puissances élevées en régime monomode transverse ( $>6\text{mW}$ ) (Fischer

et al. 2001) montre également la flexibilité du système bicavité. En effet l'émission multimode peut basculer dans un régime monomode dans une configuration telle que la seconde cavité modifie thermiquement le décalage entre gain et résonance et améliore leur recouvrement. Une augmentation du rendement quantique a également été observé suite aux contributions additives des deux zones de gain (Grasso et al. 2006). De manière similaire à l'utilisation d'une section d'absorbant saturable, l'exploitation des propriétés non-linéaires des matériaux ouvrent à des fonctionnalités de bistabilité (Fischer et al. 2000) ou de dynamiques de basculement facilement configurables et exploitables dans ces composants (Michler et al. 1997). La démonstration la plus prospective est une structure à triple cavité imaginée par l'équipe de J. Tignon de l'École Normale (Diederichs et Tignon 2005) et réalisée par le LPN. Cette réalisation monolithique d'un oscillateur paramétrique optique (OPO) permet la génération de photons intriqués utilisés en cryptographie ou la génération de nouvelles fréquences dans des domaines spectraux non accessibles aux composants laser existants (Diederichs et al. 2006). Les OPO qui sont des sources exploitant des effets optiques non linéaires permettent de générer un rayonnement cohérent largement accordable. Un photon de pompe avec une fréquence  $\omega_p$  est converti dans un OPO en un photon signal et un photon complémentaire respectivement aux fréquences  $\omega_s$  et  $\omega_i$  telles que  $\omega_s + \omega_i = \omega_p$ . Ces OPO sont très intéressants pour des applications d'optique quantique comme la cryptographie quantique. Bien entendu, la réalisation de ce type de structures nécessite une très grande maîtrise de l'épithaxie, et donc mériterait une simplification de la structure verticale comme celle proposée plus loin (cf. § 3.4).

Les verrous technologiques principaux pour l'aboutissement de ces composants très innovants en termes de fonctionnalités optiques sont d'une part l'injection électrique maîtrisée via plusieurs électrodes dans l'empilement vertical, et d'autre part l'obtention de propriétés de faisceau équivalentes entre les différentes cavités. Le premier aspect lié à une géométrie tri-dimensionnelle du composant conditionne en particulier l'accordabilité des propriétés d'émission spectralement et en amplitude, accordabilités qui ouvrent la voie vers une plus grande flexibilité du composant pour l'application visée. Ces architectures existent en technologie microélectronique, mais requièrent encore beaucoup d'effort de développement dans la filière optoélectronique III-V. Le second aspect limitant qu'est le confinement latéral à plusieurs niveaux peut lui être solutionné grâce à une meilleure maîtrise, voire une ingénierie du confinement AlOx, comme je l'ai présenté dans le chapitre précédent. Enfin, en s'affranchissant du pompage optique, la levée de ce verrou concrétiserait l'évolution de la manip sur table optique à un composant intégrable, et donc à l'exploitation de ces phénomènes physiques novateurs dans des systèmes optoélectroniques plus fonctionnels. Les approches basées sur les cristaux photoniques sont également capables de telles prouesses, mais souffrent encore du manque de solutions pour le pompage électrique.

### 3.1.2 Composant BiVCSEL : pour la génération d'un rayonnement térahertz par photomélange

#### Principes

Aux moult applications citées ci-dessus issues des potentialités d'un VCSEL à multiples cavités, vient s'ajouter la génération d'ondes térahertz. Ce sujet a été initié par L. Chusseau durant mon postdoc. Il proposait alors de réaliser l'épitaxie d'un VCSEL intégrant deux cavités couplées (BiVCSELs), pour obtenir une émission bimodale, et de là générer un battement térahertz entre les deux modes longitudinaux. La structure imaginée comportait deux cavités d'épaisseur identiques, dont l'une seulement comportait une zone gain sous la forme de puits quantiques InGaAs (98nm). Ainsi l'écart spectral est fixé par le couplage entre les champs électromagnétiques dans les deux cavités ; le couplage produit la dégénérescence qui se traduit par deux modes de cavité. Ce « coefficient » de couplage est lié à la transmission du miroir de Bragg central et donc à son nombre de périodes.

L'équipe du Prof. K. Choquette a démontré plus récemment sur un VCSEL à cavités couplées la génération de signaux microondes. Plusieurs méthodes ont été utilisées :

- en appliquant simultanément une modulation directe sur les deux cavités ; la réponse de modulation globale est alors la superposition des réponses individuelles de chaque cavité. De plus cette courbe de réponse peut être modifiée en ajustant les amplitudes de chaque cavité, donnant ainsi accès à une bande passante étendue et un pic de relaxation moins marqué pour une réponse en modulation optimisée (Chen et Choquette 2009a).
- d'autre part, un mélange de signaux microondes est généré lorsque deux fréquences différentes sont injectées sur chacune des cavités. Ici aussi le photomélange peut être optimisé en faisant varier la composante continue appliquée au BiVCSEL (Chen et Choquette 2009b).

Ces fonctionnalités sont donc propres aux lasers à cavités couplées comme le BiVCSEL, et s'avèrent très prometteuses pour de nouvelles applications pour les futurs réseaux de données de faible puissance.

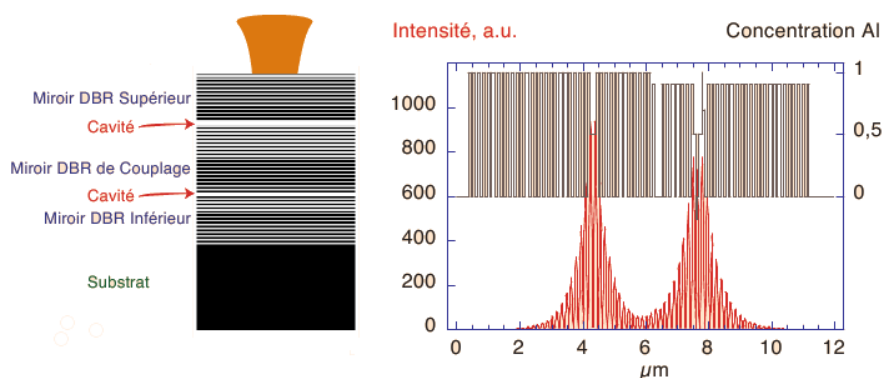


FIG. 3.1 – Schéma de la structure et distribution du champ EM selon le profil d'indice.



### Développements expérimentaux

J'ai travaillé sur ce type de composant dès 2000 alors que j'étais en postdoc à l'UCSB en collaboration avec Laurent Chusseau. Récemment alors que j'avais déjà intégré le LAAS, qui s'intéressait aussi à ces composants, nous avons relancé ce sujet à partir d'une structure épitaxiée par Avalon Photonics. Voici les résultats prometteurs qui ont été déjà obtenus à l'UCSB.

Il est important de noter qu'en complément au couplage optique, le couplage thermique est assuré dans ce type de composant monolithique. Ainsi, l'absence d'une forte différence de température entre les deux cavités permet de maintenir constant le décalage entre les deux modes et par lien la fréquence de battement, qui est donc stable. La fabrication se rapproche de celle d'un VCSEL standard puisque le composant comprend deux électrodes appliquées à la cavité active.

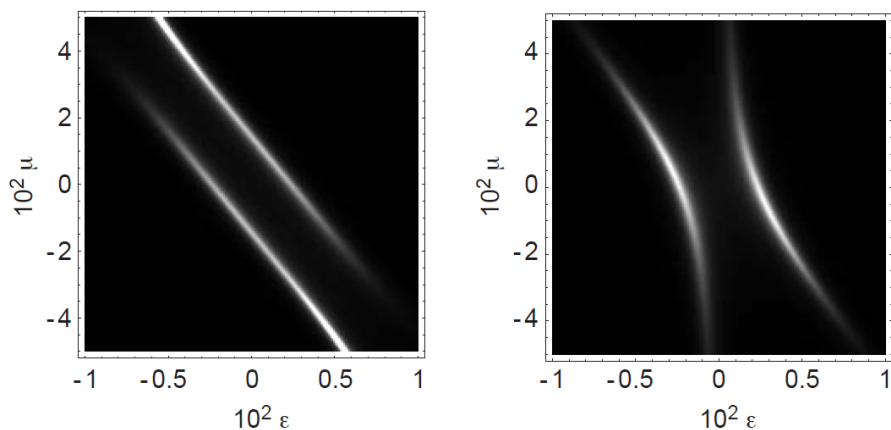


FIG. 3.2 – Intensité optique en transmission d'un BiVCSEL à 1THz, en fonction des variables de désaccord  $\epsilon$  et  $\mu$ . La longueur d'onde du VCSEL est 980 nm, l'épaisseur des cavités est  $\lambda/2$  avec 19 périodes pour le DBR de couplage et 14 pour les DBRs fermant les cavités.

Sur le premier composant fabriqué à l'UCSB (Chusseau et al. 2002), nous avons pu montrer un couplage entre les deux cavités, bien que comme illustré par le spectre d'émission (cf. fig. 3.2 : deux pics de résonance Fabry-Pérot très rapprochés en longueur d'onde soient visibles).

Suite au projet AS no 207 « Sources et Systèmes THz », nous avons fait réaliser par la société Avalon Photonics une nouvelle structure épitaxiale (cf. Fig. 3.6). L'écart entre les modes a été mesuré à environ 1,5 THz avec une faible variation selon la position sur le wafer. Nous avons conçu cette structure schématisée sur la fig. 3.5 avec 3 électrodes NPN, donnant ainsi la possibilité de commander les deux cavités indépendamment, et/ou de réaliser une accordabilité en fréquence.

Une autre originalité de la technologie appliquée à ce composant est le double diaphragme d'AlOx. Nous avons réalisé grâce au four décrit dans le chapitre précédent (cf. § 2.2.1) un contrôle en temps réel de la double oxydation. Cependant l'écart de vitesse d'oxydation entre les couches N et P oxydées ne nous a pas permis lors du process de fabrication réalisé au LAAS d'avoir un diamètre de diaphragme identique. Un process de fabrication est en cours de développement en considérant les points critiques

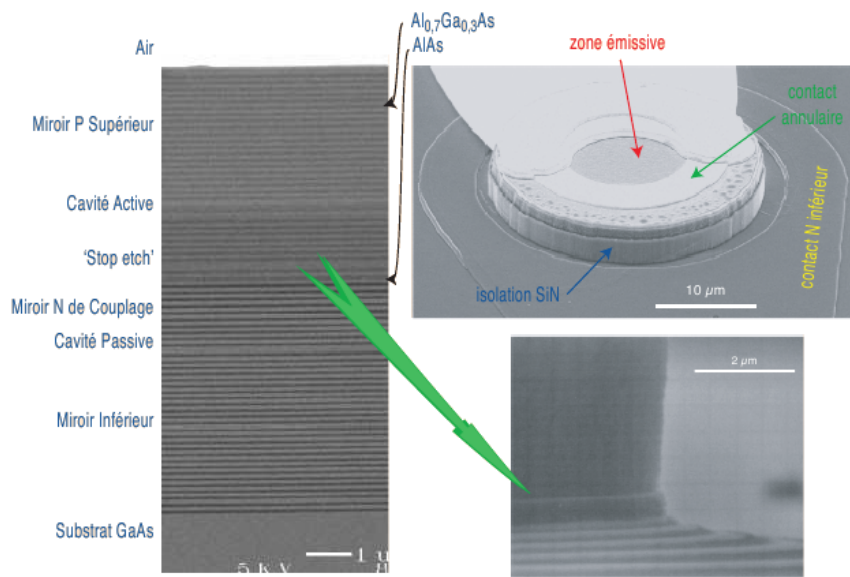


FIG. 3.3 – Composant BiVCSEL incluant une cavité active et une autre passive : épitaxie et technologie réalisées à l'UCSB

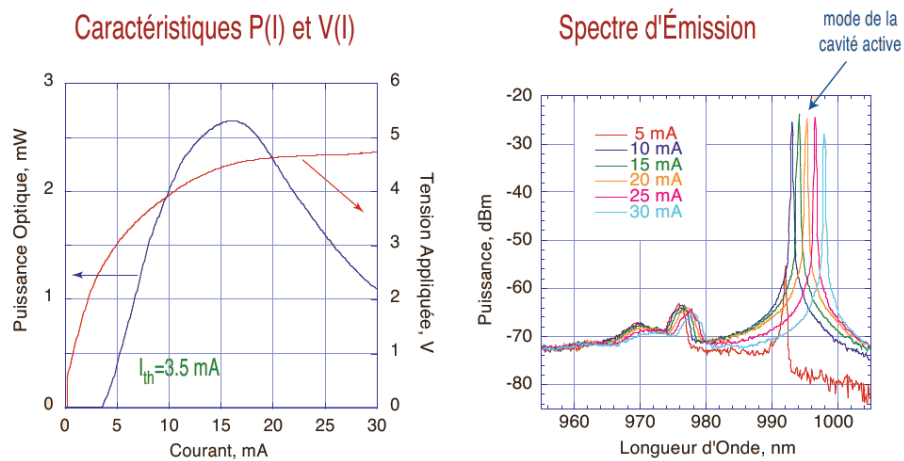


FIG. 3.4 – Caractéristique Puissance-tension-courant et spectre d'émission du BiVCSEL fabriqué à l'UCSB

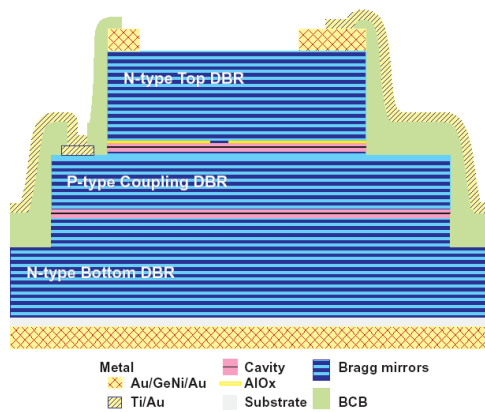


FIG. 3.5 – Schéma d'une structure BiVCSEL, à deux cavités actives, NPN à trois électrodes, conçue au LAAS

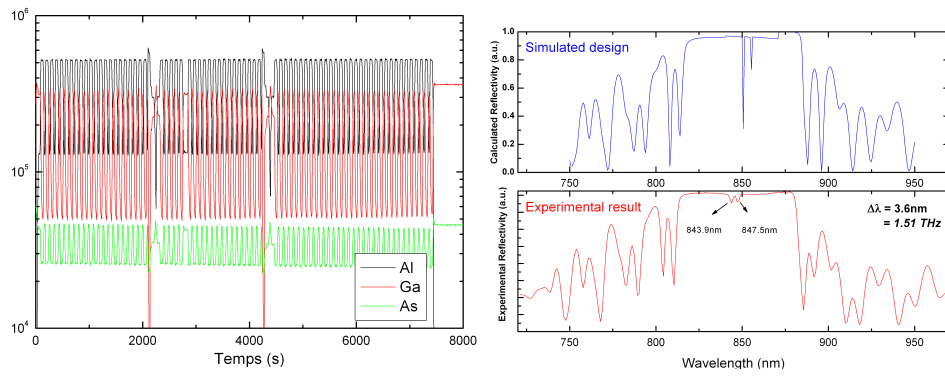


FIG. 3.6 – Profil SIMS et spectre de réflectivité de la structure épitaxiée par Avalon Photonics

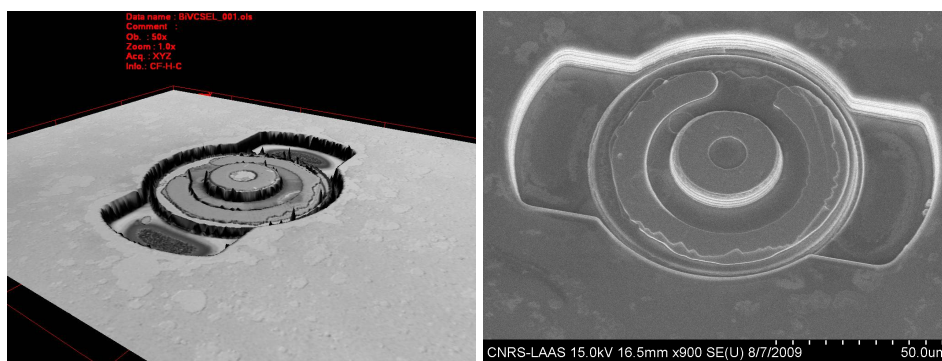


FIG. 3.7 – Process de fabrication réalisé au LAAS sur une structure BiVCSEL NPN épitaxiée par Avalon Photonics

que soulève cette structure : double mesa, double metallisation, relief très important.

### Perspectives

La réalisation de microcavités ou de VCSELS à cavités multiples répondra à l'attente de composants pour de multiples nouvelles applications : génération micro-onde, OPO, modulation rapide, détection intégrée, etc.. Des projets de recherche ont été récemment lancés qui se proposent d'aboutir à des nouveaux composants photoniques répondant à ces besoins applicatifs, citons les projets ANR PNANO BASTET 2009-2011 "Bimode All-Semiconductor laser-photomixer Terahertz EmiTter" et GEMINI 2007-2010 "GEneration of quantum correlated photons from multiple Microcavities and photoNIC microstructures". Cependant, la compatibilité de ces nouveaux composants avec les systèmes photoniques actuels, reste problématique notamment à cause de la difficulté d'adresser ces composants par voie électrique.

Concernant les perspectives au sein du LAAS d'une réalisation de VCSELS à multiples cavités, l'installation prochaine d'un bâti d'épitaxie de nouvelle génération sera déterminante. En effet, les performances attendues (homogénéité, stabilité, large surface épitaxiée) de cette machine MBE multi-substrats, permettront la fabrication courante de structures à empilements complexes telles que le BiVCSEL. Nous avons développé ces dernières années un procédé de fabrication stabilisé pour les composants VCSELS, et obtenu des premiers résultats encourageants sur les BiVCSELS, en trouvant des solutions techniques adaptés et fiables : oxydation, gravure, lithographie.

Enfin, suivant l'exemple de développement de réseaux diffractants présenté plus loin dans ce chapitre, une des solutions palliant à la complexité de l'empilement vertical est l'intégration de structures photoniques planaires en substitution des miroirs de Bragg. D'autre part, l'autre avantage de recourir à une structuration latérale au sein du composant est d'accéder à la maîtrise concomitante des propriétés optiques du faisceau telle que l'accordabilité spectrale, la polarisation ou la divergence, au niveau de la conception du composant.

## 3.2 EXPLOITATION ET GUIDAGE DU SIGNAL LATÉRAL

### 3.2.1 Intérêt

L'intégration d'une source dans un système pose notamment le problème de connaître en temps réel et précisément les caractéristiques du faisceau délivré. S'agissant des VCSELS, leur forte intégrabilité a soulevé un problème qui est la mesure de puissance de cette source (monitoring), sans pour autant dégrader ses caractéristiques. Plusieurs solutions ont été proposées, en exploitant les propriétés de détection de la même structure verticale du VCSEL, mais se sont heurtées à la sélectivité spectrale imposée par la microcavité d'une part, et d'autre part à la nécessité d'avoir un objet réfléchissant lorsque VCSEL et détecteur partagent le même substrat. La solution retenue par les industriels qui est d'ajointre un photodétecteur

externe jouxtant l'émetteur, et qui nécessite le montage sur un support hybride, n'est donc pas applicable à une application basée sur une intégration monolithique.

Dans le groupe Photonique, les activités sur la photodétection dans les structures VCSELS ont débuté en 2000, avant mon arrivée au LAAS, en évoluant ces dernières années vers une intégration monolithique de la fonction de détection à l'émetteur VCSEL avec deux types de géométries : détection intégrée latérale et détection verticale dans un composant à double cavité.

L'observation de l'émission spontanée d'un laser au delà du seuil peut permettre de sonder des zones de la région active pour lesquelles le gain n'est pas saturé (Paoli 1973). L'intensité émise latéralement dans un VCSEL est d'ailleurs une fraction beaucoup plus importante d'émission latérale par rapport à l'émission verticale, ceci étant confirmé par les calculs de redistribution de l'émission spontanée dans une microcavité (Zhang et al. 1995). Les applications alors envisagées étaient l'abaissement du seuil et l'amélioration du rendement par la diminution de cette émission latérale. (Shin et Lee 1995) ont proposé de déduire les recombinaisons non-radiatives à l'aide du signal latéral détecté par un VCSEL voisin. Les mêmes auteurs ont par la suite observé une baisse de la densité d'inversion causée par un effet de lentille thermique dans les VCSELS implantés (Shin et al. 1996).

Le signal émis latéralement peut également être exploité comme contrôle de l'émission du laser (monitoring de puissance), ceci en considérant phénoménologiquement que la fraction d'émission spontanée détectée sur la tranche de la cavité croît de façon monotone par rapport à la puissance de sortie du laser, sans pour cela qu'ils soient directement corrélés. Il faudra en particulier tenir compte des différents phénomènes physiques advenant au dessus du seuil, tels ceux cités plus haut (lentilles thermiques, etc.), et qui peuvent altérer cette corrélation.

L'accès direct à l'information sur la densité de porteurs au seuil est par ailleurs fortement valorisable dans le cas de la détection précoce de défaillance (Roscher et al. 2007) ou encore pour la mesure quantitative de la rétroinjection dans un VCSEL (Perchoux et Bosch 2007).

Enfin, le contrôle de puissance peut être réalisé en déviant perpendiculairement une partie du faisceau vers un détecteur voisin. Pour ce faire, l'adjonction d'une couche de couplage et/ou d'un déflecteur est nécessaire. (Louderback et al. 2004) ont montré qu'un réseau diffractant inséré dans la structure verticale du VCSEL permet de remplir cette fonction. Ceci requiert un effort dans la fabrication car elle impose une reprise d'épitaixie. On pourrait aussi envisager d'affiner la conception du réseau intégré tel un cristal photonique, afin de façonner les propriétés du faisceau émis verticalement.

Ce type de composant est également fortement attractif pour les applications de capteurs fonctionnant sur le principe de la rétroinjection optique. Ce thème est étudié par le laboratoire de T. Bosch à l'ENSHEEIT récemment rattaché au LAAS. En effet, l'intégration de détecteurs au sein des lasers, permettrait la mise en parallèle des capteurs, car la configuration actuelle intégrant une photodiode à l'arrière ou à côté du VCSEL n'est pas compatible avec une telle intégration de matrices de capteurs. A noter

que des résultats récents ont montré la possibilité d'obtenir un signal dépendant du taux de réinjection dans le VCSEL via une simple mesure de tension à ces bornes (Tucker et al. 2007).

### 3.2.2 Travaux menés au LAAS

Notre équipe a proposé et étudié de nouvelles structures intégrant simultanément les fonctions d'émission et de détection, tout en étant associées de façon monolithique dans un VCSEL (Bardinal et al. 2002). Ce type de dispositif offre ainsi la capacité de mesurer et contrôler en temps réel la puissance émise par le laser. Fort de ces résultats, nous avons obtenu avec le LETI, Intexys et Infineon un projet RMNT OSA<sub>131</sub> (2003-2005). Le but du projet OSA<sub>131</sub> était la réalisation d'un micro module d'émission  $1.31 \mu\text{m}$  à 10Gbit/s multi-standards, ceci implique un niveau d'intégration qui permettra l'assemblage sur un même substrat des fonctions d'émission optique (laser) et de pilotage ainsi que les solutions d'alignement passif d'une fibre optique monomode sur l'émetteur. Il a fait l'objet d'une collaboration avec le LETI-CEA et la société IntexyS (Garcia et al. 2005).

Une thèse a été menée sur ce sujet par Cédric Amat, que j'ai co-encadrée avec Thierry Camps. Dans ce projet, j'ai ainsi été principalement impliqué dans la stabilisation de la technologie de fabrication et l'automatisation des caractérisations sous pointe (P(I) et spectres d'émission) des composants VCSEL.

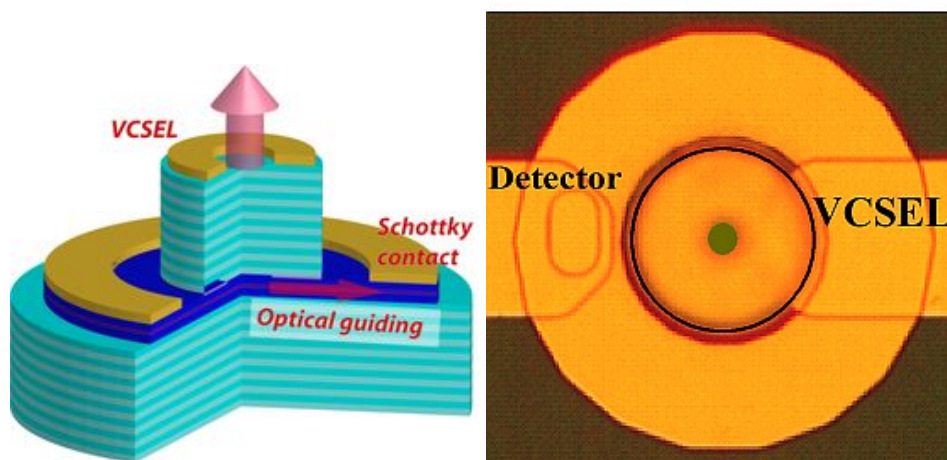


FIG. 3.8 – Schéma de principe et exemple de réalisation d'un VCSEL multifonctionnel intégrant émission et détection.

Le principe du VCSEL multifonctionnel est basé sur la collection et la détection du signal émis dans la direction latérale par rapport à l'émetteur vertical. Cette composante du signal ne participe ainsi pas directement à l'émission stimulée, et donc ne perturbe en rien le fonctionnement du VCSEL. L'idée originale que nous avons proposée et exploitée est de conserver un guidage optique de ce signal émis latéralement au sein de la cavité du laser. (Bardinal et al. 2006) ont montré théoriquement et expérimentalement que le guide optique formé dans le plan de la cavité permettait une augmentation notable de l'efficacité de détection. Pour réaliser la détection, notre approche a évolué depuis l'utilisation d'un VCSEL

voisin comme détecteur latéral, jusqu'à la formation sur la cavité d'un contact Schottky annulaire collectant les porteurs photogénérés (Camps et al. 2005).

Nous avons également envisagé les possibilités d'amélioration du signal électrique détecté à partir du guidage latéral. Une des solutions consiste à isoler électriquement le détecteur de l'émetteur. Les solutions envisagées sont la gravure d'une tranchée, au détriment du guidage latéral du signal utile, ou une implantation ionique de la zone entre émetteur et détecteur. La seconde solution a été testée durant la thèse de C. Amat. Elle permet une réduction notable du courant de fuite qui contribue au courant détecté dans le cas de la géométrie la plus simple.

### 3.2.3 Perspectives

Dans la continuité de ces travaux, je compte m'investir fortement sur l'intégration verticale d'émetteur/détecteur. Elle consiste à utiliser un VCSEL incluant deux cavités empilées plus ou moins couplées avec un miroir de Bragg intermédiaire. Cette approche présente l'avantage d'avoir une détection directe de l'émission stimulée et donc une mesure « fidèle » de la puissance émise. La structure demeure cependant très complexe à fabriquer, du fait de l'épaisseur totale du composant et de la nécessité d'avoir des cavités optiques strictement jumelles. Les difficultés ne sont pas limitées à l'épitaxie mais concernent aussi la réalisation technologique décrites précédemment. Nous avons pu cependant résoudre bon nombre de ces complications puisque nous avons pu démontrer un composant BiVCSEL dont l'émission et la détection pouvaient être réalisées complémentaires par l'une ou l'autre cavité.

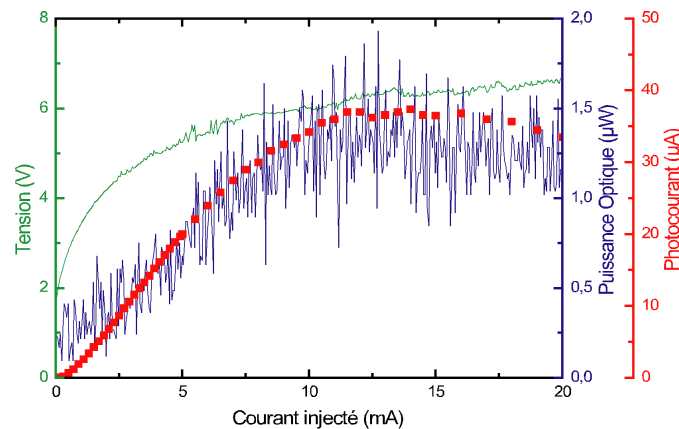


FIG. 3.9 – Caractéristiques d'émission par une cavité et de détection par la seconde cavité, et de tension aux bornes du composant BiVCSEL.

Les multiples perspectives applicatives d'une telle géométrie de composants ont été abordées dans le paragraphe précédent. Dans le cadre de la collaboration avec le groupe de T. Bosch sur l'application de la rétroinjection optique pour la mesure à haute précision de déplacement et de vitesse, l'intérêt et l'apport de la détection intégrée est particulièrement pertinente. Les deux types de systèmes (détection verticale ou latérale) vont en particulier permettre une meilleure intégration du composant au

sein du capteur, ainsi que leur extension matricielle. Un autre aspect plus fondamental de cette collaboration est l'étude du phénomène physique de la rétro-injection, ceci afin de mieux comprendre l'influence des paramètres physiques et géométriques dans les VCSELS.

### 3.3 UNIFORMISATION DE L'INJECTION ÉLECTRIQUE DANS LES VCSELS

#### 3.3.1 Contexte

L'uniformisation de l'injection dans les lasers constitue l'une des solutions pour contrôler les propriétés du faisceau d'émission. Il s'agit en particulier de compenser les effets thermiques extrêmement dépendant de la puissance de pompage, afin d'assurer une reproductibilité des propriétés d'émission quelqu' soit le niveau d'injection et donc d'émission. La gestion thermique étant extrêmement problématique au niveau des zones actives, elle se reporte sur l'extraction de chaleur via le packaging du composant, mais de fait réduit les possibilités d'intégrabilité. Dans le cas des VCSELS, ces phénomènes thermiques ont pu être globalement réduits sur des composants de petit diamètre par l'emploi de confinement AlOx. Les problèmes de l'augmentation de puissance liée à une extension en surface de la zone active pose toujours le problème de l'uniformisation spatiale du niveau d'injection. D'autres applications souffrent également de cette limitation, comme celle du laser à solitons de cavité sur laquelle nous avons travaillé. Expérimentalement, (Gazula et al. 2005) ont utilisé des microstructurations latérales des résistances d'hétérostructure au niveau de la cavité, afin de découpler les confinements électriques et optiques, mais en ayant recours à une reprise d'épitaxie. (Crump et al. 2008) a également proposé une solution pour les lasers ruban mais pouvant s'appliquer également aux VCSELS, en appliquant des gravures localisées de trous visant à modifier le profil de porteurs et l'intensité optique.

#### 3.3.2 Application aux solitons de cavité

Dans le cadre du projet européen FunFACS (2005-2008), le groupe Photonique du LAAS a pris en charge une étude menant à l'amélioration de l'uniformité spatiale de l'injection électrique sur des VCSELS de large surface, l'émission se faisant vers le haut de la structure épitaxiée. L'application visée dans ce projet était la génération et la manipulation de solitons de cavité localisés spatialement sur les larges surfaces des composants. Nous avons réalisé au LAAS des composants prototypes VCSEL intégrant des modifications de structure en vue de l'uniformisation spatiale de l'injection électrique. Des étapes additionnelles ont été intégrées au procédé de fabrication standard des VCSELS pour satisfaire les contraintes de formation de solitons : structuration de la surface d'injection et dépôt d'un contacts transparent. Ce travail a été conduit dans le cadre de la thèse d'Eric Havard, codirigée par V. Bardinal et T. Camps, auquel j'ai participé dans l'optimisation des procédés technologiques et la mise en place de la procédure de tests sous pointe semi-automatiques sur wafers.



La solution étudiée lors de cette thèse pour une uniformisation d'injection a été d'utiliser un contact semi-transparent tel que l'ITO (indium tin oxide) sur la surface d'émission du VCSEL. Quelques travaux avaient été réalisés sur les VCSELs (Jeziarski et al. (1993), Matin et al. (1994), Thornton et al. (1995), Chua et al. (1997), Jiang et al. (2002)), mais sont restés sans suite au niveau du transfert industriel. L'étude menée par E. Havard sur des contacts ITO fabriqués au LAAS montrent que, bien que la résistivité ait pu être fortement abaissée par l'utilisation de recuit, les phénomènes de diffusion interfaciale sont limitants (Havard et al. 2008), du moins dans le cas où le béryllium est utilisé comme dopage P. Par ailleurs, la tenue mécanique de l'ITO sur des surfaces structurées reste un problème pour l'intégration dans un composant. Cette étude va être poursuivie par V. Bardinal pour mettre au point une électrode transparente sur VCSELs, avec des propriétés améliorées, en ITO ou ZnO dont les premiers essais sont prometteurs. En effet, il est important de maîtriser la fabrication de ces couches minces sur GaAs, car l'utilisation de contact transparents reste une solution attractive pour améliorer l'uniformisation de l'injection dans les VCSELs. Elle permettrait en particulier en le couplant à un confinement latéral optique compatible avec des composants de large surface, une parfaite adaptation du mode optique au profil des porteurs pour une émission de forte puissance monomode.

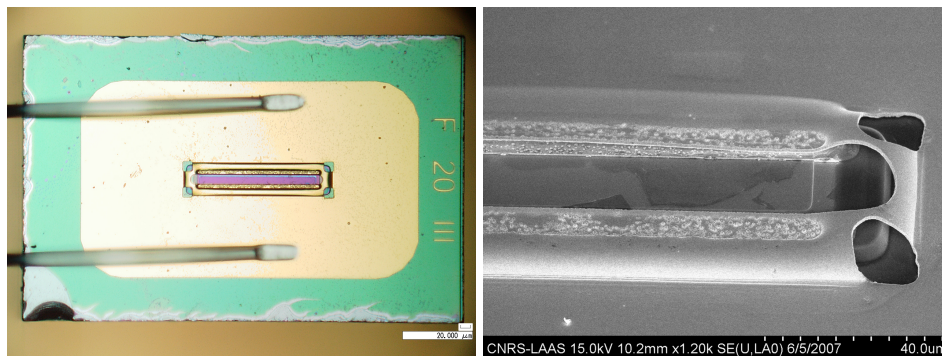


FIG. 3.10 – Métallisation à pont à air

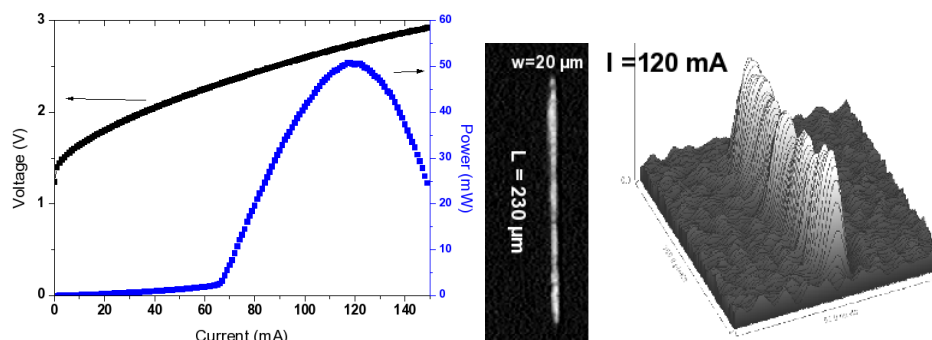


FIG. 3.11 – Caractéristiques des VCSELs filiformes et répartition de l'émission

D'autres solutions plus sophistiquées ont également été envisagées lors de la thèse d'E. Havard, qui se basent sur une distribution contrôlée des flux d'injection sur la surface du VCSEL. Ceci passe par la réa-

lisation de zones de différentes conductivités distribuées sur la surface soit par l'exploitation de zones isolantes localisées (comme l'AlOx ou le SiO<sub>2</sub>) ou d'une différence locale des résistances d'accès entre différentes hétérostructures. E. Havard a étudié par modélisation puis par des expérimentations l'effet de ces distributions spatiales des zones d'injection de propriétés différentes sur l'homogénéisation de l'injection. La fig. 3.12 montre l'efficacité de cette méthode, même si le modèle utilisé est purement électrique, et ne prend pas en compte les autres effets optiques et thermiques intervenant lors de l'émission stimulée. Sur ce dernier point, (Arias et al. 2007) ont montré l'effet positif de la re-distribution des porteurs suscitée lors de l'émission stimulée, du fait de l'incrément de courant nécessaire dans la zone d'émission, qui contrebalance l'effet du « spatial hole burning ».

Grâce à une attaque de la couche superficielle surdopée sous le contact et à la présence d'une électrode ITO, nous avons réalisé lors de la thèse de Eric Havard des VCSELs filiformes (cf. fig. 3.10) capable d'émettre une puissance élevée ( $P_{max} = 50mW$ ) pour une surface d'émission de  $230 \times 20 \mu m^2$ . Une amélioration des caractéristiques des VCSELs filiformes par rapport à une géométrie symétrique avait été observée par (Huffaker et al. 1996) sur des composants de petite dimension. Les avantages de ce type de géométrie fortement dissymétrique réside dans une modification des propriétés thermiques et d'une distribution différente des modes spatiaux. On peut de plus considérer comme l'illustre la fig. 3.11 une meilleure uniformité d'injection facilitée par la proximité des zones de contacts.

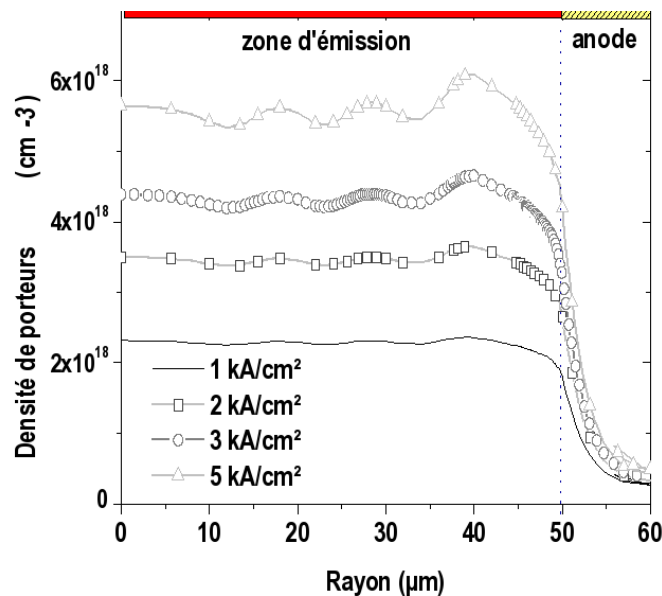


FIG. 3.12 – Uniformisation de l'injection par implémentation de zones localisées isolantes (calculs SILVACO)

A l'avenir, la technologie PAIOx sera dans ce cadre un outil important pour parvenir à des motifs d'injection dont la répartition soit efficace.

### 3.4 MIROIR À RÉSEAU DIFFRACTANT SUB-LONGUEUR D'ONDE À BASE D'ALOX

#### 3.4.1 Principes et contexte

Cette dernière partie de chapitre aborde l'intégration de structures latérales au sein de composants VCSELS, ceci afin d'utiliser les potentialités et fonctionnalités des réseaux diffractants voire de cristaux photoniques. Il a largement été démontré théoriquement et expérimentalement que les propriétés de résonance des modes guidés dans un réseau planaire diélectrique permettent une façonnage très flexible des filtres en transmission et/ou réflexion. En particulier, l'utilisation d'un tel filtre au sein de composants donne accès à une simplification de la structure verticale puisque les propriétés optiques convoitées peuvent être réalisées avec un nombre très limité de couches. En plus des flexibilités d'intégration et des propriétés de filtrage, d'autres avantages sont apportés : la polarisation et la stabilité monomodale peuvent également être fixées par construction.

Considérant la problématique des VCSELS, des filtres planaires à plus ou moins large bande passante peuvent être réalisées avec un choix approprié de leurs paramètres géométriques, ceci afin de se substituer aux empilements multicouches relativement massifs que sont les miroirs de Bragg (Tibuleac et Magnusson 1997). En effet, des travaux récents ont mené à l'intégration de réseaux de diffraction bidimensionnels au sein de microcavités, en utilisant des structures à large contraste d'indice air/semiconducteur (Boutami et al. (2007a), Huang et al. (2007)), simplifiant ainsi drastiquement la structure conventionnelle à multicouches quart d'onde.

La contrainte d'un très faible indice au dessous du réseau diffractant est imposée sur ce type d'empilement très compact, afin d'assurer une réflectivité maximale proche de 100% et ce, sur une large bande autour de la longueur d'onde de fonctionnement.

D'autres démonstrations expérimentales ont confirmé les nombreux avantages offerts par cette technologie comme l'accordabilité en longueur d'onde (Zhou et al. 2008b), l'émission polarisée et strictement monomode (Goeman et al. 1998), et l'exaltation de l'interaction lumière-matière pour réaliser un capteur biologique (Huang et al. 2008) ou autre, l'accès au grandes longueurs d'onde (Boutami et al. 2007b).

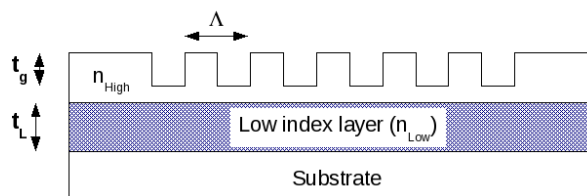


FIG. 3.13 – Schéma du réseau diffractant et paramètres géométriques agissant sur les propriétés de réflectivité.

### 3.4.2 Exploitation de la technologie AlOx

Au cours de la thèse de Moustapha Condé, nous avons souhaité utiliser les propriétés diélectriques et mécaniques de l'AlOx pour réaliser un réseau de diffraction hautement réfléchissant, en exploitant le faible indice de l'oxyde formé ( $n \approx 1.6$ ). Les solutions utilisés dans la littérature (air/semiconducteur ou  $Si/SiO_2$  déposé par CVD) ne permettent en effet pas une intégration compacte et mécaniquement stable. Notre proposition s'appuie sur une technologie mature - l'oxydation d'AlAs -, déjà largement utilisée dans les procédés de fabrication des VCSELs, y compris par les industriels. Cette technologie offre également une bonne maîtrise et uniformité de l'épaisseur des couches réalisées par épitaxie, et de meilleures propriétés thermiques liées au caractère monolithique de l'hétérostructure GaAs/AlOx.

Nous avons réalisé une première série de miroirs à réseau résonnant en formant les créneaux par lithographie électronique puis gravure ICP-RIE (masque PMMA), et dans une seconde étape en libérant les flancs par gravure d'une méssa afin de réaliser l'oxydation d'une couche sous-jacente d'AlAs. L'oxydation de cette dernière a été réalisée sous contrôle in-situ, sans que ne soit observée de délamination.

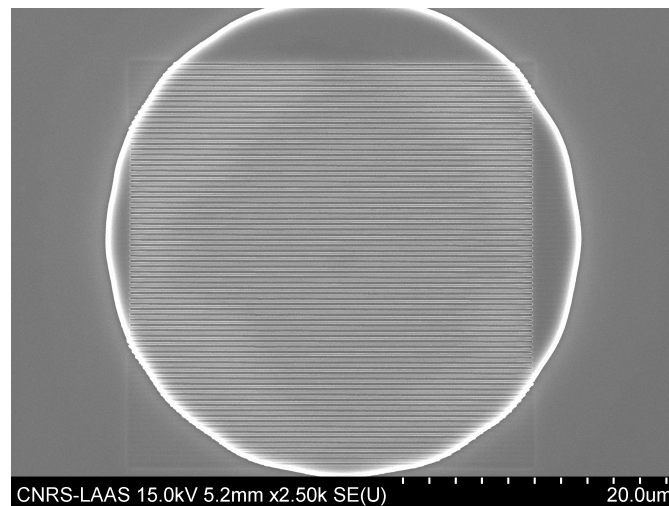


FIG. 3.14 – Réseau diffractant réalisé par lithographie électronique, gravure ICP et oxydation d'une sous-couche AlAs.

Les paramètres géométriques de la structure pour une longueur d'onde autour de  $1 \mu m$  ont déjà été étudiés dans un travail récent (Chung et al. 2008). Dans le but de réduire au maximum l'impact de l'AlOx sur les pertes optiques du dispositif, nous avons fait le choix d'utiliser une épaisseur d'oxyde minimale. Ce choix influe également bénéfiquement sur les caractéristiques mécaniques de la structure semiconducteur / oxyde.

L'intérêt manifeste de ce type de miroir est la tolérance relativement souple des caractéristiques optiques envers certains paramètres géométriques, en contraste avec les miroirs de Bragg (Zhou et al. 2008a). Ce fait valorise l'intérêt de ces structures possédant un processus de fabrication fiable et reproductible. La figure 3.15 montre les influences respectives de l'épaisseur de la couche GaAs en surface et de la profondeur de gravure

dans le réseau. Ces calculs ont été réalisés avec la méthode RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) à l'aide des logiciels Unigit<sup>1</sup> et RODIS<sup>2</sup>.

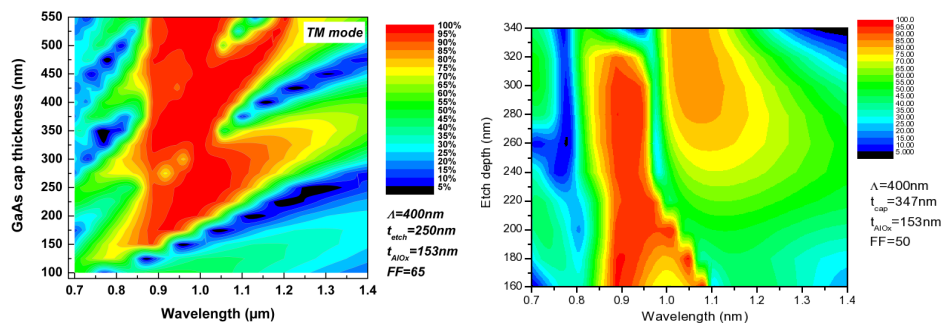


FIG. 3.15 – Variation des réflectivités en fonction d'une variation de l'épaisseur de la couche GaAs en surface structurée, et de la profondeur de gravure du réseau ( $\lambda_{op} = 1 \mu\text{m}$ )

L'épaisseur de la couche dans laquelle est gravé le réseau a une importance significative sur la largeur de bande de réflectivité. Selon la figure 3.15, une bande de haute réflectivité sur 300 nm ou plus peut être obtenue pour certaines épaisseurs de cette couche superficielle. Les variations de largeur de bande par rapport à une erreur sur cette épaisseur de couche reste faible par rapport aux précisions établies de l'épitaxie. D'autre part le contrôle précis de la profondeur des créneaux composant le réseau est directement liée au procédé de gravure. D'après la figure 3.15, on ne note pas d'évolution notable du spectre de réflectivité par rapport à ce paramètre, qui par conséquent n'impose pas de critère sévère sur la gravure sèche. Nous n'avons cependant pas examiné l'influence du profil des créneaux sur ces propriétés optiques.

Le facteur de remplissage a par contre une incidence notable sur la largeur de la bande de haute réflectivité comme l'illustre la figure 3.16. Ainsi, dans notre cas, un facteur de remplissage (du semiconducteur par rapport à l'air supérieur) à 70% est nécessaire pour atteindre une largeur de bande suffisante dans le cas de l'intégration à un VCSEL.

Les propriétés optiques des réseaux réalisés ont été mesurés par spectroscopie à transformée de fourier (FTIR) et par reflectométrie directe à l'aide d'un laser accordable TiSa. La différence de réflectivité entre les polarisations TE et TM ont été observées, ainsi qu'une réflectivité maximum supérieure à 90%. Néanmoins nous nous sommes confrontés à la difficulté d'une mesure résolue angulairement, puisque la variation du spectre de réflectivité d'un tel réseau peut largement varier même pour des angles d'incidence faibles. Ainsi la mesure obtenue au travers d'un objectif d'ouverture numérique 0,3 reflète une moyenne des contributions entre 0 et  $17,5^\circ$ .

<sup>1</sup>[www.unigit.com](http://www.unigit.com)

<sup>2</sup>[photonics.intec.ugent.be/research/facilities/design/rodix/default.htm](http://photonics.intec.ugent.be/research/facilities/design/rodix/default.htm)

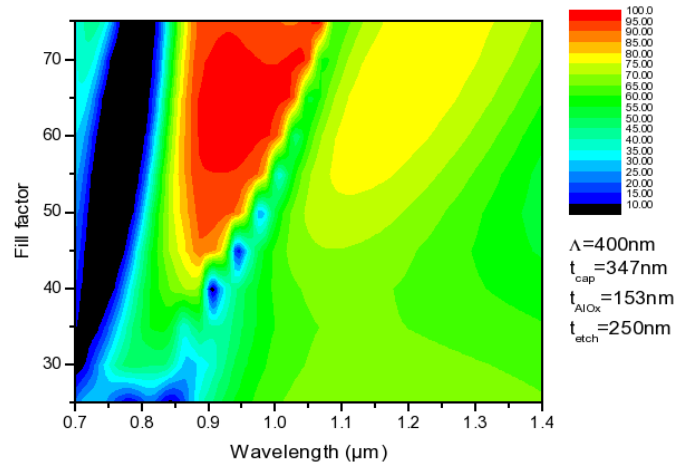


FIG. 3.16 – Variation de la réflectivité en fonction d'une variation du facteur de remplissage du réseau semiconductor / air ( $\lambda_{op} = 1 \mu\text{m}$ )

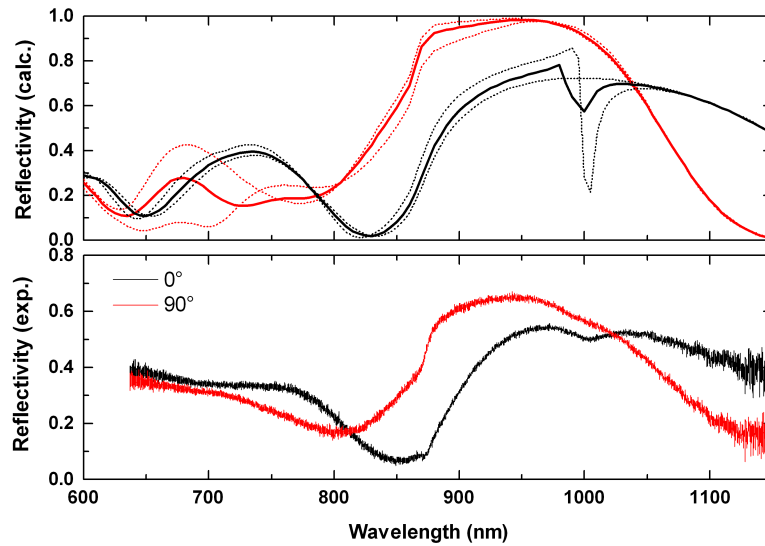


FIG. 3.17 – Reflectivité mesurée et calcul : les courbes pointillées indiquent les réflectivités aux angles 0 et 16°, la courbe en trait plein est une moyenne de toutes les contributions angulaires

### **Perspectives : exploitation pour les VCSELs sur GaAs dans le proche infrarouge et sur GaSb pour $\lambda > 2,6 \mu\text{m}$**

Comme énoncé précédemment, est apparue récemment dans la littérature, une solution permettant, dans un VCSEL, de substituer le ou les miroirs de Bragg par des structures à réseaux résonnants (Huang et al. 2007). Ces réseaux, du fait de leur symétrie, peuvent par conception présenter des réflectivités élevées, tout en étant sélectives en polarisation TE ou TM, et ainsi contrairement au DBR à multicouche fixer efficacement la polarisation du faisceau laser. On dispose donc d'un outil de contrôle, simplement *via* la lithographie, qui permet non seulement de choisir la polarisation de la lumière émise, mais également de discriminer les modes transverses d'ordre supérieurs avec des rapports supérieurs à 35 dB (Zhou 2008). Un autre avantage qui découle des précédents est l'augmentation de la puissance monomode émise, en utilisant des diaphragmes de confinement plus larges, en levant nombres de contraintes liés à la reproductibilité technologique. Les résultats ont été obtenus principalement au LEOM ECL Lyon et dans le laboratoire du Prof. Chang-Hasnain à Berkeley, avec des démonstrations étonnantes sur des VCSELs GaAs intégrant des miroirs à réseaux. D'une part les structures réalisées restent compatibles avec un pompage électrique, mais présentent des améliorations notables sur le façonnage des propriétés du faisceau. La fabrication de ces structurations latérales, bien que leurs performances optiques soient assez peu sensibles aux erreurs sur leurs paramètres géométriques, nécessitent l'accès à une technologie sub-micronique. Aujourd'hui les nanotechnologies appliquées aux composants photoniques ne sont pas tout à fait matures pour un transfert industriel. On peut cependant envisager que des techniques de nano-impression pourront contribuer à une industrialisation prochaine de ces procédés.

Dans les applications de spectroscopie moléculaire, les VCSELs ont déjà prouvé leur excellente prédisposition en tant que source compacte facilement intégrable (Affolderbach et al. 2000). Pour ce type d'applications, les longueurs d'onde moyen infrarouge ( $\lambda > 2,6 \mu\text{m}$ ) ouvrent un vaste champ de recherches en permettant la détection de nombreuses molécules, et ce pour de multiples domaines d'exploitation : l'environnement avec la détection de gaz polluants, la médecine avec de nouvelles possibilités d'aide au diagnostics, ou encore dans l'agroalimentaire ou le contrôle de procédés industriels (sécurité, suivi du procédé) (Jean et Bende (2003), Giberti et al. (2004)). Un verrou propre aux VCSELs émettant aux grandes longueurs d'onde réside corrélativement dans l'épaisseur des couches épitaxiées (par ex.  $t=16 \mu\text{m}$  pour  $\lambda=2,7 \mu\text{m}$ ), au détriment des performances thermo-electro-optiques du composant. Par ailleurs, les nouveaux matériaux en cours de développement que sont les antimoniures, couvrant la gamme  $\lambda > 2 \mu\text{m}$ , ne montrent pas d'aussi bons rendements radiatifs que les filières plus conventionnelles GaAs et InP. Ceci, bien que d'excellents résultats aient été récemment démontrés avec la filière antimonium autour de  $2,3 \mu\text{m}$  (Ouvrard et al. 2005). Ainsi, la technologie basée sur substrat InP permet d'obtenir des composants VCSELs très performants jusqu'à  $2,3 \mu\text{m}$ , alors que au delà de  $2,6 \mu\text{m}$  seules des régions actives réalisées dans la filière antimonium sont possibles. Un contournement

de ces difficultés, qui a été mis à profit pour les VCSELs émettant au delà de  $2 \mu\text{m}$ , consiste à utiliser une structure hybride semiconducteur-diélectrique. L'approche monolithique doit cependant être privilégiée, en vue d'une application en spectroscopie, puisqu'elle est garante d'une amélioration des composants à température ambiante. La source idéale devrait en effet avoir une puissance suffisante pour préserver un rapport signal sur bruit acceptable, une faible largeur de raie pour une bonne sélectivité et sensibilité, un fonctionnement monomode longitudinal afin d'éviter la compétition entre modes, un faisceau fortement collimaté, une accordabilité en fréquence rapide pour un faible temps de réponse et de forts débits d'acquisition, et une susceptibilité minimale aux conditions environnementales. Les VCSELs remplissent la majorité de ces conditions, bien que le contrôle de polarisation et le fonctionnement monomode transverse restent encore problématiques. Dans le projet ANR Blanc MARSUPILAMI, impliquant l'IES Montpellier, Supélec Metz et le LAAS, débutant en septembre 2009, et que je coordonne, nous nous proposons de développer un miroir à base d'un réseau sub-longueur d'onde, s'intégrant dans une structure VCSEL à base d'antimoniure pour une émission au delà de  $2.6 \mu\text{m}$  épitaxiée à l'IES. Cette solution permet, en outre de résoudre les verrous liés à l'épaisseur de ces structures laser, d'avoir un miroir permettant le contrôle, au travers de sa conception, de la polarisation du faisceau émis tout en maintenant l'émission monomode transverse. La simulation optique et la conception de ce miroir sera réalisée à Supélec à l'aide d'une méthode de calcul numérique originale basée sur le principe des automates cellulaires. De plus, la réalisation d'un tel miroir implique une levée de verrous technologiques comme la maîtrise de la gravure des alliages antimoniures à l'échelle nanométrique, ainsi que de l'oxydation thermique sélective de ces alliages. Notre proposition vise ainsi un développement expérimental de VCSELs pompés électriquement émettant dans le moyen infrarouge, avec pour but une extension de la longueur d'onde d'émission alliée à une amélioration notable des performances électro-optiques.

## CONCLUSION DU CHAPITRE

Les différents exemples décrits dans ce dernier chapitre illustrent l'axe principal de recherche de l'équipe VCSEL, qui est d'utiliser les potentialités de la technologie des VCSELs pour une diversification des fonctionnalités et une adaptation à des applications innovantes. En se basant sur les capacités et les flexibilités en termes d'intégration qu'offrent les dispositifs à base de microcavité, ces illustrations montrent en particulier l'apport de la structuration latérale à la fois pour des confinements électrique et optique découplés, mais aussi dans le but d'une maîtrise des propriétés de l'émetteur laser via une conception et des géométries adaptées.

La principale innovation de ces dernières années, ici dans le cas des VCSELs – mais qui peut être déclinée aux autres géométries de laser à semiconducteur – est le passage d'une structuration unidimensionnelle à une structuration bi- ou tri-dimensionnelle permettant par une meilleure flexibilité de fixer les propriétés d'émission et affiner les performances en fonction de l'application visée. C'est en particulier le cas de l'introduc-



tion de cristaux photoniques dans les miroirs de Bragg pour une émission monomode, la structuration superficielle pour fixer la polarisation, etc..

Les solutions proposées dans ce chapitre considèrent également la contrainte fondamentale imposée par l'industrialisation : minimiser l'impact des nouvelles géométries sur les caractéristiques intrinsèques du composant. Cette équation n'est pas encore résolue dans le cas de l'implémentation de cristaux photoniques dans les composants du fait de l'altération trop importante sur les propriétés électriques et thermiques.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## ÉPITAXIE PAR JETS MOLÉCULAIRES POUR LA PHOTONIQUE GAAS

Un nouveau réacteur de MBE va être installé au LAAS cette année. Ce bâti, dont la géométrie nous permettra ainsi d'épitaxier simultanément 3 wafers de 2", et ce avec une uniformité meilleure que 2% et une stabilité des flux, et pars suite de généraliser nos études composants vers des tailles de substrat de 3" et 4" compatibles avec le monde industriel. De fait, ce nouvel équipement nous offre l'opportunité de pousser nos recherche en cours et notre savoir-faire en épitaxie afin d'améliorer les performances de nos composants et d'être force de proposition de nouvelles performances et nouvelles conceptions de structures dans la filière AlGaAs toujours dans le dessein d'étendre le champ de multifonctionnalités des VCSELs. De nouvelles conceptions de dispositifs basées sur des technologies innovantes s'appuyant fortement sur l'épitaxie pourront être poursuivies et évaluées dans le cas d'un possible transfert industriel : on citera la reprise de croissance sur des surfaces structurées, traitées par la technique du PAIOx, ou incluant des reliefs. Cette mise à niveau de notre équipement sur un plan international, est essentielle pour les développements applicatifs autour des VCSELs, dans lesquels le LAAS est impliqué : structures à solitons de cavité extrêmement sensibles aux épaisseurs, dispositifs multifonctionnels basés sur la rétroinjection dans les VCSELs ; ils nous donnera également accès à une comparaison statistiquement plus fiable entre plaquettes réalisées et une distribution plus aisée de nos échantillons à nos partenaires pour des études poussées. Ces deux aspects sont fondamentaux dans la méthodologie scientifique applicable à l'étude de composants optoélectroniques.

Les études matériaux sur lesquels s'étayeront les évolutions des composants VCSEL seront de plusieurs ordres :

Nous étudierons d'une part les propriétés de structures quantiques à bas de la diversité des alliages III-(As,N,Sb) en explorant les combinaisons d'hétérostructures sur substrat GaAs. Nous espérons ainsi étendre la gamme spectrale d'émission et d'optimiser les propriétés radiatives et de transport pour les zone active des composants ; un exemple étant la réalisation de de jonctions tunnel de basse résistivité grâce à l'alignement des bandes décalées (de type II) de ces hétérostructures, avec un apport significatif pour les architectures des type intracavité pour l'injection électrique.

## ARCHITECTURE INTÉGRÉE MULTIFONCTIONNELLE DES LASERS À CAVITÉ VERTICALE

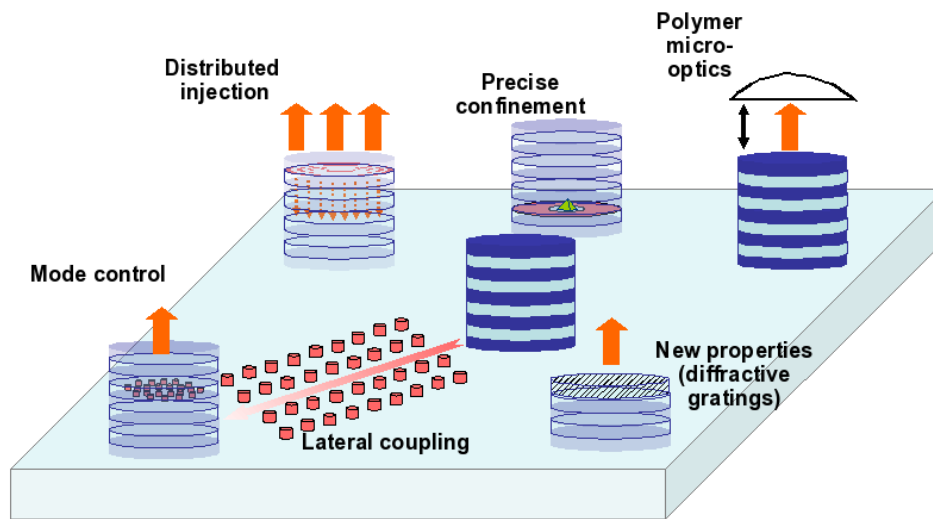


FIG. 3.18 – Vue synthétique des études prospectives sur les géométries VCSEL pour des fonctionnalités avancées

### Apport de la structuration latérale dans les VCSELs

Si on considère le verrou actuel de l'incompatibilité des technologies de confinement comme l' $\text{AlOx}$  pour un contrôle précis et une flexibilité en termes de forme et de dimension de la zone active, la potentialité d'introduire une structuration locale sub-micronique au sein d'une couche (plus ou moins proche de la cavité) amènerait un nouvel outil unique pour adapter et affiner les fonctions optiques des VCSELs. Ainsi, l'une de mes priorités est de continuer et renforcer l'exploitation des technologies de modulation de l'indice ( $\text{PAIOx}$  ou autre) en les intégrant aux composants. Ces techniques, qui permettent d'aborder séparément les aspects de fonctionnement électrique et optique, découlent directement de la maîtrise de la technologie de reprise d'épitaxie citée plus haut.

Nous allons également explorer l'intérêt du contrôle de polarisation et modal dans les VCSELs via la substitution du miroir supérieur par un réseau diffractant. Au delà de la simplification substantielle de l'empilement vertical, bénéfique à une amélioration des performances, la maîtrise des propriétés optiques du faisceau seront directement appliquées par une conception adaptée de ces structures diffractives sub-longueur d'onde intégrées. L'originalité de notre approche – l'utilisation de la technologie  $\text{AlOx}$  – amène des avantages notoires de compacité et monolithicité compatible avec le pompage électrique du laser. De plus cette approche va être développée sur deux filières GaAs et GaSb, en réponses aux différentes contraintes imposées par les applications visées dans ces deux cas. Le nouveau projet ANR Marsupilami, en collaboration avec l'IES Montpellier et Supélec Metz et que je coordonne, aura ainsi pour but d'obtenir

une meilleure efficacité d'émission pour des VCSELs émettant au-delà de  $2.6\mu\text{m}$  pour la détection de gaz.

### **Ingénierie de l'injection électrique dans les dispositifs photoniques**

Dans le but de contrôler l'injection électrique dans les composants, nous proposons de combiner le concept d'injection localisée et distribuée par une structuration latérale des couches aux avantages qu'offrent la jonction Esaki comme la faible résistance d'accès et l'étalement latéral des lignes de courant. L'injection localisée multi-zones sera en particulier étudiée, en modelant les propriétés d'injection en surface, par reprise d'épitaxie, implantation ou insertion distribuée de zones isolantes, pouvant être réalisées par la technologie PAIOx. L'amélioration de la distribution spatiale de l'injection de porteurs dans les composants photoniques sera bénéfique dans le cas des VCSELs. L'étude des contacts transparents (ITO, ZnO, ..) qui devront être associés à ces structurations transverses sera essentielle pour l'obtention de composants performants (V. Bardinal, collab. CIRI-MAT). Ces développements se veulent génériques, c'est à dire dans un dessein de conserver les capacités de transfert de technologie vers d'autres systèmes de matériaux et d'autres fenêtres spectrales.

### **Nouvelles et multi-fonctionnalités**

Nous allons poursuivre les études sur la détection intégrée dans les VCSELs en proposant des améliorations et en les exploitant dans de nouvelles applications. Ce type de dispositif compact et intégré intéresse en particulier le domaine des capteurs, notamment ceux basés sur la rétro-injection optique. Notre collaboration avec le groupe de T. Bosch, récemment affilié au LAAS portera sur ce sujet sur lequel nos propositions sont très innovantes. Le groupe de TONA à Bruxelles (K. Panajotov, H. Thientpont) souhaitent également s'associer à cette étude. Je développerai l'approche basée sur le couplage vertical entre cavités pour ces applications. Mais l'intérêt du couplage entre cavités dans une structure de type VCSEL est infiniment plus large, puisque de nouveaux phénomènes physiques et/ou des améliorations significatives des performances pourraient faire appel à ce type de technologies : OPO, génération microonde du GHz au THz, modulation externe. En résumé, dans le contexte d'évolution des moyens et de la prospective scientifique du groupe photonique, l'extension des fonctionnalités optiques autour des émetteurs sera examiné autant via des structurations verticales avec l'appui du nouveau réacteur d'épitaxie, que par des structurations latérales par l'intégration des nouveaux procédés.

Les grandes évolutions à retenir de ces dernières années (sur les VCSELs mais plus généralement en photonique) reposent assurément sur l'élargissement du champ applicatif des composants photoniques, avec une claire démonstration de leur grande flexibilité d'intégration dans des systèmes compacts d'interconnexion, et dans les microsystèmes et systèmes à destination du grand public. Ces avancées sont en particulier liées, outre à la stabilisation de nouvelles filières de matériaux, au déve-

loppement des efforts d'ingénierie faits au cœur des structures grâce aux nouvelles possibilités offertes par les micro-nanotechnologies.

# BIBLIOGRAPHIE

- C. Affolderbach, A. Nagel, S. Knappe, C. Jung, D. Wiedenmann, et R. Wynands. Nonlinear spectroscopy with a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL). *Applied Physics B : Lasers and Optics*, 70(3) :407–413, 2000. (Cité page 64.)
- Ahmad N. Al-Omari, G.P. Carey, S. Hallstein, J.P. Watson, G. Dang, et K.L. Lear. Low thermal resistance high-speed top-emitting 980-nm VCSELs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(11) :1225 – 1227, 2006. ISSN 1041-1135. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2006.875059>. Low thermal resistance;Vertical-cavity surface-emitting laser;Heat flow;. (Cité page 19.)
- G. Almuneau. *Etude et réalisation de lasers à cavité verticale à 1.55 μm sur GaSb*. PhD thesis, Université Montpellier II, Septembre 1998. (Cité page 3.)
- G. Almuneau, R. Bossuyt, P. Collière, M. Condé, I. Suarez, L. Bouscayrol, V. Bardinal, et C. Fontaine. Real-time in-situ monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in vcsels. *Semiconductor Science and Technology*, 2008. (Cité page 28.)
- G. Almuneau, F. Genty, L. Chusseau, N. Bertru, B. Fraisse, et J. Jaquet. Molecular beam epitaxy growth of 1.3 μm high-reflectivity AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirror. *Electronics Letters*, 33(14) :1227–1228, 1997. ISSN 0013-5194. (Cité page 3.)
- G. Almuneau, F. Genty, A. Wilk, P. Grech, A. Joullie, et L. Chusseau. GaInSb/AlGaAsSb strained quantum well semiconductor lasers for 1.55 μm operation. *Semiconductor Science and Technology*, 14(1) :89 – 92, 1999. ISSN 0268-1242. URL <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/14/1/014>. Gallium antimonide;Pulsed threshold current density;Bragg mirrors;Monolithic vertical cavity semiconductor lasers;. (Cité page 3.)
- G. Almuneau, E. Hall, T. Mukaihara, S. Nakagawa, C. Luo, D.R. Clarke, et L.A. Coldren. Improved electrical and thermal properties of InP-AlGaAsSb Bragg mirrors for long-wavelength vertical-cavity lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(10) :1322–1324, 2000a. ISSN 1041-1135. (Cité page 19.)
- G. Almuneau, E. Hall, S. Nakagawa, J.K. Kim, D. Lofgreen, O. Sjolund, C. Luo, D.R. Clarke, J.H. English, et L.A. Coldren. Molecular beam epitaxial growth of monolithic 1.55 μm vertical cavity surface emitting lasers with AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors. *Journal of Vacuum*

- Science and Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 18(3) : 1601 – 1604, 2000b. ISSN 0734-211X. URL <http://dx.doi.org/10.1116/1.591436>. Aluminum gallium arsenic antimonide; Long wavelength vertical cavity surface emitting lasers (LW-VCSEL); Aluminum arsenic antimonide; Distributed Bragg reflectors;. (Cité page 14.)
- Guilhem Almuneau, Antonio Muñoz Yagüe, Thierry Camps, Chantal Fontaine, et Véronique Bardinal-delagnes. Planar oxidation method for producing a localised buried insulator, August 2006. URL <http://www.freepatentsonline.com/WO2006082322.html>. (Cité page 40.)
- A. C. Alonzo, X. C. Cheng, et T. C. McGill. Effect of cylindrical geometry on the wet thermal oxidation of AlAs. *Journal of Applied Physics*, 84(12) :6901–6905, 1998. URL <http://link.aip.org/link/?JAP/84/6901/1>. (Cité page 32.)
- C. Amat, G. Almuneau, P. Gallo, L. Jalabert, S. Moudjji, P. Dubreuil, T. Camps, J.B. Doucet, E. Havard, V. Bardinal, C. Fontaine, et A. Muñoz Yagüe. Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures. *Electronics Letters*, 43(13) :730–732, 2007. ISSN 0013-5194. (Cité page 41.)
- J. Arias, L. Borrueal, B. Romero, et I. Esquivias. Two-dimensional simulation of current self-distribution in oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers. Dans *Electron Devices, 2007 Spanish Conference on*, pages 119–122, 31 2007-Feb. 2 2007. (Cité page 59.)
- T. Asano, D. Feezell, R. Koda, M.H.M. Reddy, D.A. Buell, A.S. Huntington, E. Hall, S. Nakagawa, et L.A. Coldren. InP-based all-epitaxial 1.3- $\mu\text{m}$  VCSELs with selectivity etched AlInAs apertures and Sb-based DBRs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 15(10) :1333 – 1335, 2003. ISSN 1041-1135. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2003.817987>. Vertical-cavity surface-emitting lasers; Distributed Bragg reflectors; Threshold current;. (Cité page 15.)
- Carol I. H. Ashby, John P. Sullivan, Paula P. Newcomer, Nancy A. Missert, Hong Q. Hou, B. E. Hammons, Michael J. Hafich, et Albert G. Baca. Wet oxidation of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  : Temporal evolution of composition and microstructure and the implications for metal-insulator-semiconductor applications. *Applied Physics Letters*, 70(18) :2443–2445, 1997. (Cité page 33.)
- V. Badilita, J.-F. Carlin, M. Ilegems, et K. Panajotov. Rate-equation model for coupled-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 40 :1646–1656, Décembre 2004. (Cité page 47.)
- V. Bardinal, L. Averseng, C. Bringer, T. Camps, J. Polesel-Marais, P. Dubreuil, C. Fontaine, E. Bedel-Pereira, C. Vergnenegre, et A. Muñoz-Yague. Experimental demonstration of oxide-mode influence in a dual-purpose oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser/resonant detector. *Applied Physics Letters*, 81(10) :1771–1772, 2002. URL <http://link.aip.org/link/?APL/81/1771/1>. (Cité page 55.)

- V. Bardinal, T. Camps, E. Daran, C. Amat, G. Almuneau, C. Bringer, M. Su-leiman, et C. Fontaine. Lateral waveguiding properties of VCSELs for integrated optical monitoring. *Optical and Quantum Electronics*, 38(4-6) :523 – 534, 2006. ISSN 0306-8919. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11082-006-0047-0>. Optical power monitoring ;Lateral detection ;Laser monitoring ;Optical waveguiding ;. (Cité page 55.)
- V. Bardinal, E. Daran, T. Leichlé, C. Vergnenègre, C. Levallois, T. Camps, V. Conedera, J. B. Doucet, F. Carcenac, H. Ottevaere, et H. Thienpont. Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter. *Opt. Express*, 15(11) :6900–6907, 2007. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-15-11-6900>. (Cité page 43.)
- O. Blum, C. I. H. Ashby, et H. Q. Hou. Barrier-layer-thickness control of selective wet oxidation of algaas for embedded optical elements. *Applied Physics Letters*, 70(21) :2870–2872, 1997. (Cité pages 32 et 38.)
- O. Blum, K.L. Lear, H.Q. Hou, et M.E. Warren. Buried refractive microlenses formed by selective oxidation of algaas. *Electronics Letters*, 32(15) :1406–1408, Jul 1996. ISSN 0013-5194. (Cité page 26.)
- J. Boucart, C. Starck, F. Gaborit, A. Plais, N. Bouche, E. Derouin, JC Remy, J. Bonnet-Gamard, L. Goldstein, C. Fortin, et al. Metamorphic DBR and tunnel-junction injection. A CW RT monolithicloug-wavelength VCSEL. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 5(3) :520–529, 1999. (Cité page 20.)
- S. Boutami, B. Benbakir, X. Letartre, J. L. Leclercq, P. Regreny, et P. Viktorovitch. Ultimate vertical fabry-perot cavity based on single-layer photonic crystal mirrors. *Opt. Express*, 15(19) :12443–12449, 2007a. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-15-19-12443>. (Cité page 60.)
- Salim Boutami, Badhise Benbakir, Jean-Louis Leclercq, et Pierre Viktorovitch. Compact and polarization controlled 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting laser using single-layer photonic crystal mirror. *Applied Physics Letters*, 91(7) :071105, 2007b. URL <http://link.aip.org/link/?APL/91/071105/1>. (Cité page 60.)
- M. Brunner, K. Gulden, R. Hovel, M. Moser, J.F. Carlin, R.P. Stanley, et M. Ilegems. Continuous-wave dual-wavelength lasing in a two-section vertical-cavity laser. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 12(10) :1316–1318, Oct 2000. ISSN 1041-1135. (Cité page 47.)
- David A. Buell, Daniel Feezell, Bjorn-Ove Finland, et Larry Coldren. Molecular beam epitaxy of InP-based alloys for long-wavelength vertical cavity lasers. *Journal of Vacuum Science and Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 24(3) :1544 – 1547, 2006. ISSN 1071-1023. URL <http://dx.doi.org/10.1116/1.2200380>. Long-wavelength vertical cavity lasers ;Bragg reflector ;Macroscopic defects ;Differential quantum efficiency ;. (Cité page 15.)



- R. S. Burton et T. E. Schlesinger. Wet thermal oxidation of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  compounds. *Journal of Applied Physics*, 76(9) :5503–5507, 1994. (Cité page 32.)
- T. Camps, C. Bringer, V. Bardinal, G. Almuneau, C. Amat, E. Daran, J.B. Doucet, P. Dubreuil, et C. Fontaine. High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs. *Electronics Letters*, 41(3) :129–131, 2005. ISSN 0013-5194. (Cité page 56.)
- J. F. Carlin, R. P. Stanley, P. Pellandini, U. Oesterle, et M. Ilegems. The dual wavelength bi-vertical cavity surface-emitting laser. *Applied Physics Letters*, 75(7) :908–910, 1999. URL <http://link.aip.org/link/?APL/75/908/1>. (Cité page 47.)
- A. Castiglia, D. Simeonov, H. J. Buehlmann, J.-F. Carlin, E. Feltin, J. Dor-saz, R. Butte, et N. Grandjean. Efficient current injection scheme for nitride vertical cavity surface emitting lasers. *Applied Physics Letters*, 90(3) :033514, 2007. URL <http://link.aip.org/link/?APL/90/033514/1>. (Cité page 26.)
- Ki Soo Chang, Young Min Song, et Yong Tak Lee. Self-aligned microlens-integrated vertical-cavity surface-emitting lasers. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 18(21) :2203–2205, Nov.1, 2006. ISSN 1041-1135. (Cité pages 26 et 32.)
- C. Chen et K. D. Choquette. Multilevel amplitude modulation using a composite-resonator vertical-cavity laser. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 21(15) :1030–1032, Aug.1, 2009a. ISSN 1041-1135. (Cité page 49.)
- Chen Chen et Kent Choquette. Microwave signal mixing in coupled-cavity vcsels. Dans *Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference*, page CMGG4. Optical Society of America, 2009b. URL <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=URI=CLEO-2009-CMGG4>. (Cité page 49.)
- K.D. Choquette, K.M. Geib, C.I.H. Ashby, R.D. Twesten, O. Blum, H.Q. Hou, D.M. Follstaedt, B.E. Hammons, D. Mathes, et R. Hull. Advances in selective wet oxidation of algaas alloys. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 3(3) :916–926, 1997. TY - JOUR. (Cité page 34.)
- KD Choquette et HQ Hou. Vertical-cavity surface emitting lasers : moving from research to manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, 85(11) :1730–1739, 1997. (Cité page 47.)
- Edmond Chow, S.Y. Lin, S.G. Johnson, P.R. Villeneuve, J.D. Joannopoulos, J.R. Wendt, G.A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou, et A. Alleman. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal. *Nature*, 407(6807) :983–986, Octobre 2000. ISSN 0028-0836. URL <http://dx.doi.org/10.1038/35039583>. (Cité page 26.)
- C.L. Chua, R.L. Thornton, D.W. Treat, V.K. Yang, et C.C. Dunnrowicz. Indium tin oxide transparent electrodes for broad-area top-emitting vertical-cavity lasers fabricated using a single lithography step. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 9(5) :551–553, May 1997. ISSN 1041-1135. (Cité page 58.)

- Il-Sung Chung, J. Mork, P. Gilet, et A. Chelnokov. Subwavelength grating-mirror vcsel with a thin oxide gap. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 20 (2) :105–107, Jan.15, 2008. ISSN 1041-1135. (Cité page 61.)
- L. Chusseau, G. Almuneau, L.A. Coldren, A. Huntington, et D. Gasquet. Coupled-cavity vertical-emitting semiconductor laser for continuous-wave terahertz emission. *IEE Proceedings -Optoelectronics*, 149(3) :88–92, 2002. ISSN 1350-2433. (Cité page 50.)
- P. Crump, P. Leisher, T. Matson, V. Anderson, D. Schulte, J. Bell, J. Farmer, M. DeVito, R. Martinsen, Y. K. Kim, K. D. Choquette, G. Erbert, et G. Trankle. Control of optical mode distribution through etched microstructures for improved broad area laser performance. *Applied Physics Letters*, 92(13) :131113, 2008. URL <http://link.aip.org/link/?APL/92/131113/1>. (Cité page 57.)
- O. Desplats, P. Gallo, J.B. Doucet, G. Monier, L. Bideux, L. Jalaubert, A. Arnoult, G. Lacoste, C. Armand, F. Voillot, et C. Fontaine. On the use of a  $o_2:sf_6$  plasma treatment on gaas processed surfaces for molecular beam epitaxial regrowth. *Applied Surface Science*, 255(6) :3897 – 3901, 2009. ISSN 0169-4332. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THY-4TMBPNR-2/2/c59c19bb4fa35a199541e909ae823f86>. (Cité page 43.)
- C. Diederichs et J. Tignon. Design for a triply resonant vertical-emitting micro-optical parametric oscillator. *Applied Physics Letters*, 87 (25) :251107, 2005. URL <http://link.aip.org/link/?APL/87/251107/1>. (Cité page 48.)
- C. Diederichs, J. Tignon, G. Dasbach, C. Ciuti, A. Lemaître, J. Bloch, Ph. Roussignol, et C. Delalande. Parametric oscillation in vertical triple microcavities. *Nature*, 440(7086) :904–907, Avril 2006. ISSN 0028-0836. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature04602>. (Cité page 48.)
- M. Le Du, I. Sagnes, G. Beaudoin, L. Travers, J.-C. Esnault, et J.-C. Harmand. Enhanced kinetics of  $al_{0.97}ga_{0.03}$  as wet oxidation through the use of hydrogenation. *Applied Physics Letters*, 89(11) :111105, 2006. (Cité page 33.)
- L. Esaki et P. J. Stiles. New Type of Negative Resistance in Barrier Tunneling. *Phys. Rev. Lett.*, 16(24) :1108–1111, Jun 1966. (Cité page 17.)
- D. Feezell, D.A. Buell, et L.A. Coldren. InP-based 1.3-1.6- $\mu$ m VCSELs with selectively etched tunnel-junction apertures on a wavelength flexible platform. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10) :2017 – 2019, 2005a. ISSN 1041-1135. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.854357>. Distributed Bragg reflectors (DBR); Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs); (Cité page 15.)
- D. Feezell, Leif A. Johansson, D.A. Buell, et L.A. Coldren. Efficient modulation of InP-based 1.3- $\mu$ m VCSELs with AsSb-based DBRs. *IEEE*

- Photonics Technology Letters*, 17(11) :2253 – 2255, 2005b. ISSN 1041-1135. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.857216>. Vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs); Semiconductor laser processing; Optical fiber communication; Distributed Bragg reflectors (DBRs); Peak-to-peak drive voltage; Small-signal bandwidth;. (Cité page 15.)
- S.A. Feld, J.P. Loehr, R.E. Sherriff, J. Wiemer, et R. Kaspi. In situ optical monitoring of AlAs wet oxidation using a novel low-temperature low-pressure steam furnace design. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10(2) : 197–199, 1998. ISSN 1041-1135. (Cité page 28.)
- A. Fiore, V. Berger, E. Rosencher, P. Bravetti, et J. Nagle. Phase matching using an isotropic nonlinear optical material. *Nature*, 391(6666) :463–466, Janvier 1998. ISSN 0028-0836. URL <http://dx.doi.org/10.1038/35091>. (Cité page 26.)
- A. J. Fischer, K. D. Choquette, W. W. Chow, A. A. Allerman, et K. M. Geib. Bistable output from a coupled-resonator vertical-cavity laser diode. *Applied Physics Letters*, 77(21) :3319–3321, 2000. URL <http://link.aip.org/link/?APL/77/3319/1>. (Cité page 48.)
- A. J. Fischer, K. D. Choquette, W. W. Chow, A. A. Allerman, D. K. Serkland, et K. M. Geib. High single-mode power observed from a coupled-resonator vertical-cavity laser diode. *Applied Physics Letters*, 79(25) :4079–4081, 2001. URL <http://link.aip.org/link/?APL/79/4079/1>. (Cité page 47.)
- A. J. Fischer, K. D. Choquette, W. W. Chow, H. Q. Hou, et K. M. Geib. Coupled resonator vertical-cavity laser diode. *Applied Physics Letters*, 75(19) :3020–3022, 1999. URL <http://link.aip.org/link/?APL/75/3020/1>. (Cité page 47.)
- I. J. Fritz, J. F. Klem, M. J. Hafich, et A. J. Howard. Novel pseudoalloy approach to epitaxial growth of complex ingaalas multilayer structures. *Applied Physics Letters*, 66(21) :2825–2827, 1995. URL <http://link.aip.org/link/?APL/66/2825/1>. (Cité page 14.)
- K. Fukatsu, K. Shiba, Y. Suzuki, N. Suzuki, T. Anan, H. Hatakeyama, K. Yashiki, et M. Tsuji. 30 Gb/s Over 100-m MMFs Using 1.1- $\mu$ m Range VCSELs and Photodiodes. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 20(11) : 909–911, June 1, 2008. ISSN 1041-1135. (Cité page 19.)
- J. Garcia, R. Hamelin, S. Bernabe, et C. Rossat. Method for Production of Electronic and Optoelectronic Circuits, Avril 12 2005. US Patent App. 11/578,304. (Cité page 55.)
- D. Gazula, J. Ahn, D. Lu, H. Huang, et D. G. Deppe. Intracavity grating-confined all-epitaxial vertical-cavity surface-emitting laser based on selective interface fermi-level pinning. *Applied Physics Letters*, 86(16) :161117, 2005. URL <http://link.aip.org/link/?APL/86/161117/1>. (Cité pages 25 et 57.)

- P. Genevet, S. Barland, M. Giudici, et J. R. Tredicce. Cavity soliton laser based on mutually coupled semiconductor microresonators. *Physical Review Letters*, 101(12) :123905, 2008. URL <http://link.aps.org/abstract/PRL/v101/e123905>. (Cité page 47.)
- F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, G. Boissier, J.-P. Malzac, P. Salet, et J. Jacquet. High reflectivity Te-doped GaAsSb/AlAsSb Bragg mirror for 1.5  $\mu\text{m}$  surface emitting lasers. *Electronics Letters*, 33(2) :140–142, 1997. ISSN 0013-5194. (Cité page 3.)
- Frederic Genty, Guilhem Almuneau, Nicolas Bertru, Laurent Chusseau, Pierre Grech, Didier Cot, et Joel Jacquet. Molecular beam epitaxy growth and characterizations of AlGaAsSb/AlAsSb Bragg reflectors on InP. *Journal of Crystal Growth*, 183(1-2) :15 – 22, 1998. ISSN 0022-0248. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248\(97\)00397-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(97)00397-7). Semiconducting aluminum gallium arsenic antimonide; Distributed Bragg reflectors;. (Cité page 3.)
- Frederic Genty, Guilhem Almuneau, Laurent Chusseau, Arnaud Wilk, Serge Gaillard, Guilhem Boissier, Pierre Grech, et Joel Jacquet. Growth and characterization of vertical cavity structures on InP with GaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors for 1.55  $\mu\text{m}$  emission. *Journal of Crystal Growth*, 201-202 :1024 – 1027, 1999. ISSN 0022-0248. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)01513-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(98)01513-9). Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL); Lattice matching; Antimonide alloys;. (Cité page 13.)
- A. Giberti, MC Carotta, V. Guidi, C. Malagù, G. Martinelli, M. Piga, et B. Vendemiati. Monitoring of ethylene for agro-alimentary applications and compensation of humidity effects. *Sensors & Actuators : B. Chemical*, 103(1-2) :272–276, 2004. (Cité page 64.)
- S. Goeman, S. Boons, B. Dhoedt, K. Vandeputte, K. Caekebeke, P. Van Daele, et R. Baets. First demonstration of highly reflective and highly polarization selective diffraction gratings (giro-gratings) for long-wavelength vcsels. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 10(9) :1205–1207, Sep 1998. ISSN 1041-1135. (Cité page 60.)
- R. Grange, O. Ostinelli, M. Haiml, L. Krainer, G.J. Spuhler, M. Ebnöther, E. Gini, S. Schon, et U. Keller. Antimonide semiconductor saturable absorber for 1.5  $\mu\text{m}$ . *Electronics Letters*, 40(22) :1414 – 1416, 2004. ISSN 0013-5194. URL <http://dx.doi.org/10.1049/el:20046058>. Semiconductor saturable absorber; Laser sources; Nonlinear reflectivity; Distributed Bragg reflectors (DBR);. (Cité page 16.)
- Rachel Grange, Simon Zeller, Markus Haiml, Olivier Ostinelli, Emilio Gini, Silke Schon, et Ursula Keller. Antimonide semiconductor saturable absorber for passive model locking of a 1.5- $\mu\text{m}$  Er : Yb : Glass laser at 10 GHz. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(7) :805 – 807, 2006. ISSN 1041-1135. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2006.871846>. Glass laser; Antimonide semiconductor; High pulse repetition rates; Metal-organic vapor phase epitaxy;. (Cité page 16.)

- D.M. Grasso, K.D. Choquette, D.K. Serkland, G.M. Peake, et K.M. Geib. High slope efficiency measured from a composite-resonator vertical-cavity laser. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 18(9) :1019–1021, 1, 2006. ISSN 1041-1135. (Cité page 48.)
- E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, O. Sjolund, H. Kroemer, et L.A. Coldren. Electrically-pumped, single-epitaxial VCSELs at 1.55  $\mu\text{m}$  with Sb-based mirrors. *Electronics Letters*, 35(16) :1337–1338, 1999a. ISSN 0013-5194. (Cité pages 14 et 20.)
- E. Hall, A. Huntington, R. Naone, H. Kroemer, et L. Coldren. Increased lateral oxidation rates of AlInAs on InP using short-period superlattices. *Journal of Electronic Materials*, 29(9) :1100–1104, Septembre 2000. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-004-0271-y>. (Cité page 31.)
- E. Hall, H. Kroemer, et L.A. Coldren. AlAsSb-based distributed Bragg reflectors using InAlGaAs as high-index layer. *Electronics Letters*, 35(5) : 425–427, Mar 1999b. ISSN 0013-5194. (Cité page 19.)
- J. C. Harmand, A. Kohl, M. Juhel, et G. Le Roux. Molecular beam epitaxy of AlGaAsSb system for 1.55  $\mu\text{m}$  Bragg mirrors. *Journal of Crystal Growth*, 175-176(Part 1) :372–376, Mai 1997. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJ6-3YCTKM6-29/2/9d6f27bc939f86d7f2b88dc8e408f1d1>. (Cité page 13.)
- E. Havard, T. Camps, V. Bardinal, L. Salvagnac, C. Armand, C. Fontaine, et S. Pinaud. Effect of thermal annealing on the electrical properties of indium tin oxide (ITO) contact on Be-doped GaAs for optoelectronic applications. *Semiconductor Science and Technology*, 23(3) : 035001 (4pp), 2008. URL <http://stacks.iop.org/0268-1242/23/035001>. (Cité page 58.)
- E.R. Hegblom, D.I. Babic, B.J. Thibeault, et L.A. Coldren. Scattering losses from dielectric apertures in vertical-cavity lasers. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 3(2) :379–389, Apr 1997. ISSN 1077-260X. (Cité page 25.)
- F. Hoehnsdorf, J. Koch, C. Agert, et W. Stolz. Investigations of (GaIn)(NAs) bulk layers and (GaIn)(NAs)/GaAs multiple quantum well structures grown using tertiarybutylarsine (TBAs) and 1,1-dimethylhydrazine (UDMH<sub>2</sub>). *Journal of Crystal Growth*, 195(1-4) :391 – 396, 1998. ISSN 0022-0248. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00651-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00651-4). Tertiarybutylarsine;Dimethylhydrazine;. (Cité page 17.)
- M.C.Y. Huang, C.F.R. Mateus, J.E. Foley, R. Beatty, B.T. Cunningham, et C.J. Chang-Hasnain. Vcsel optoelectronic biosensor for detection of infectious diseases. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 20(6) :443–445, March 15, 2008. ISSN 1041-1135. (Cité page 60.)
- Michael C.Y. Huang, Y. Zhou, et Connie J. Chang-Hasnain. A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength gra-

- ting. *Nature Photonics*, 1(2) :119–122, 2007. TY - JOUR 10.1038/nphoton.2006.80. (Cité pages 60 et 64.)
- D. L. Huffaker, H. Deng, Q. Deng, et D. G. Deppe. Ring and stripe oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers. *Applied Physics Letters*, 69(23) :3477–3479, 1996. URL <http://link.aip.org/link/?APL/69/3477/1>. (Cité page 59.)
- R. Intartaglia, T. Taliercio, P. Valvin, G. Almuneau, P. Lefebvre, T. Guillet, T. Bretagnon, et B. Gil. Longitudinal-optical phonon broadening due to nitrogen atom incorporation in InGaAsN/GaAs quantum wells. *physica status solidi (c)*, 2(11) :3887–3890, 2005. URL <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.200562039>. (Cité page 17.)
- B. Jean et T. Bende. Mid-IR laser applications in medicine. *TOPICS IN APPLIED PHYSICS*, 89 :511–544, 2003. (Cité page 64.)
- A.F. Jezierski, M.A. Matin, S.A. Basher, T.S. Cheng, D. Lacklison, T. Foxon, T.M. Benson, M. Heath, J. Orton, et A.A. Rezazadeh. Transparent indium tin oxide (ito) ohmic contacts to both p- and n-gaas for surface emitting lasers. Dans *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1993. LEOS '93 Conference Proceedings. IEEE*, pages 446–447, Nov 1993. (Cité page 58.)
- Wen-Jang Jiang, Meng-Chyi Wu, Hsin-Chieh Yu, Chun-Yuan Huang, Chia-Pin Sung, et Jim-Yong Chi. The effect of indium tin oxide as an ohmic contact for the 850 nm gaas oxide-confined vcsels. *Solid-State Electronics*, 46(11) :1945 – 1948, 2002. ISSN 0038-1101. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TY5-45GKJFC-1/2/79973f70e546cf296c61d584608d17a8>. (Cité page 58.)
- D.-B. Kao, J.P. McVittie, W.D. Nix, et K.C. Saraswat. Two-dimensional thermal oxidation of silicon. ii. modeling stress effects in wet oxides. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 35(1) :25–37, Jan 1988. ISSN 0018-9383. (Cité page 35.)
- J.-H. Kim, D. H. Lim, K. S. Kim, G. M. Yang, K. Y. Lim, et H. J. Lee. Lateral wet oxidation of  $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ -gaas depending on its structures. *Applied Physics Letters*, 69(22) :3357–3359, 1996. (Cité page 32.)
- Thomas Knodl, Matthias Golling, Axel Straub, Roland Jager, Rainer Michalzik, et Karl Joachim Ebeling. Multistage Bipolar Cascade Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers : Theory and Experiment. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 9(5) :1406 – 1414, 2003. ISSN 1077-260X. URL <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819484>. Vertical-cavity surface emitting lasers (VCSEL); Bipolar cascade VCSEL; Diode cascade VCSEL; Esaki diode; Multistage VCSEL; Tunnel junction;. (Cité page 20.)
- Masahiko Kondow, Kazuhisa Uomi, Atsuko Niwa, Takeshi Kitatani, Seiji Watahiki, et Yoshiaki Yazawa. GaInNAs : a novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 : Regular Papers & Short*

- Notes & Review Papers*, 35(2B) :1273 – 1275, 1996. Gallium indium nitrogen arsenide; Long wavelength range laser diodes; Ideal band line up; High temperature performance;. (Cité page 17.)
- P.C. Ku, J.A. Hernandez, et C.J. Chang-Hasnain. Buried selectively-oxidized algaas structures grown on nonplanar substrates. *Optics Express*, 10(19) :1003–1008, 2002. (Cité page 35.)
- Pei-Cheng Ku et C.J. Chang-Hasnain. Thermal oxidation of algaas : modeling and process control. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 39(4) : 577–585, 2003. TY - JOUR. (Cité page 31.)
- Li-Hong Lai, H.C. Kuo, Gong-Ru Lin, L.-W. Lai, et S.C. Wang. As/sup +/-implanted algaas oxide-confined vcsel with enhanced oxidation rate and high performance uniformity. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 16 (6) :1423–1425, June 2004. ISSN 1041-1135. (Cité page 33.)
- T. Langenfelder, St. Schroder, et H. Grothe. Lateral oxidation of buried al<sub>x</sub>ga<sub>1-x</sub> layers in a wet ambient. *Journal of Applied Physics*, 82(7) :3548–3551, 1997. Lateral oxidation as function of time, Al, T, thickness, Mesa. (Cité page 32.)
- A.C. Lehman, D.F. Siriani, et K.D. Choquette. Two-dimensional electronic beam-steering with implant-defined coherent vcsel arrays. *Electronics Letters*, 43(22) :-, 25 2007. ISSN 0013-5194. (Cité page 27.)
- Ann C. Lehman, Jr. James J. Raftery, Aaron J. Danner, Paul O. Leisher, et Kent D. Choquette. Relative phase tuning of coupled defects in photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers. *Applied Physics Letters*, 88(2) :021102, 2006. URL <http://link.aip.org/link/?APL/88/021102/1>. (Cité page 27.)
- P.O. Leisher, A.J. Danner, J.J. Raftery, D. Siriani, et K.D. Choquette. Loss and Index Guiding in Single-Mode Proton-Implanted Holey Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. *IEEE Journal on Quantum Electronics*, 42 (10) :1091–1096, Oct. 2006. (Cité page 25.)
- J. Li, W. Zhang, Ch. Li, et Zh. Du. A thermodynamic assessment of the Ga-As-Sb system. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 19 (5) :466–472, Octobre 1998. URL <http://dx.doi.org/10.1361/105497198770341950>. (Cité page 13.)
- H.G. Liu, O. Ostinelli, Y.P. Zeng, et Colombo R. Bolognesi. Emitter-size effects and ultimate scalability of InP :GaInP/GaAsSb/InP DHBTs. *IEEE Electron Device Letters*, 29(6) :546 – 548, 2008. ISSN 0741-3106. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2008.920850>. Double heterojunction bipolar transistors (DHBTs); Current gain; Emitter-size effects (ESEs);. (Cité page 16.)
- H.G. Liu, O. Ostinelli, Y.P. Zeng, et C.R. Bolognesi. High-current-gain InP/GaInP/GaAsSb/InP DHBTs with  $f_T = 436$  GHz. *IEEE Electron Device Letters*, 28(10) :852 – 855, 2007a. ISSN 0741-3106. URL <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2007.905461>. Current gain; Higher base doping levels; Smaller emitter geometries;. (Cité page 16.)

- Honggang Liu, Olivier Ostinelli, Yuping Zeng, et C.R. Bolognesi. High-gain arsenic-rich n-p-n InP/GaAsSb DHBTs with  $F_{T} > 420$  GHz. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 54(10) :2792 – 2795, 2007b. ISSN 0018-9383. URL <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2007.904981>. Current-gain cutoff frequencies; Dc current gain; Conduction band discontinuity;. (Cité page 16.)
- D.A. Louderback, G.W. Pickrell, H.C. Lin, M.A. Fish, J.J. Hindi, et P.S. Guilfoyle. VCSELs with monolithic coupling to internal horizontal waveguides using integrated diffraction gratings. *Electronics Letters*, 40(17) : 1064–1065, 2004. ISSN 0013-5194. (Cité page 54.)
- D. E. Mars, Y.-L. Chang, M. H. Leary, S. D. Roh, et D. R. Chamberlin. Low-resistance tunnel junctions on GaAs substrates using GaInNAs. *Applied Physics Letters*, 84(14) :2560–2562, 2004. URL <http://link.aip.org/link/?APL/84/2560/1>. (Cité page 20.)
- M.A. Matin, A.F. Jeziarski, S.A. Bashar, D.E. Lacklison, T.M. Benson, T.S. Cheng, J.S. Roberts, T.E. Sale, J.W. Orton, C.T. Foxon, et A.A. Rezazadeh. Optically transparent indium-tin-oxide (ito) ohmic contacts in the fabrication of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Electronics Letters*, 30(4) :318–320, Feb 1994. ISSN 0013-5194. (Cité page 58.)
- P. Michler, M. Hilpert, et G. Reiner. Dynamics of dual-wavelength emission from a coupled semiconductor microcavity laser. *Applied Physics Letters*, 70(16) :2073–2075, 1997. URL <http://link.aip.org/link/?APL/70/2073/1>. (Cité page 48.)
- S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, H. Kroemer, et L.A. Coldren. 1.55- $\mu$ m InP-lattice-matched VCSELs with AlGaAsSb-AlAsSb DBRs. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(2) :224–230, 2001. ISSN 1077-260X. (Cité pages 15 et 21.)
- R.L. Naone, E.R. Hegblom, B.J. Thibeault, et L.A. Coldren. Oxidation of algaas layers for tapered apertures in vertical-cavity lasers. *Electronics Letters*, 33(4) :300–301, 1997. (Cité page 32.)
- M. Osinski, T. Svimonishvili, G.A. Smolyakov, V.A. Smagley, P. Mackowiak, et W. Nakwaski. Temperature and thickness dependence of steam oxidation of alas in cylindrical mesa structures. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 13(7) :687–689, 2001. TY - JOUR. (Cité page 32.)
- O. Ostinelli. *Long wavelength VCSELs with MOVPE grown AlGaAsSb/InP bragg reflectors*. PhD thesis, Diss., Naturwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zuerich, Nr. 16503,, 2006. URL <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:28716>. Hartung-Gorre Verlag, Konstanz Series in Quantum Electronics edited by Henry Baltes, Peter Guenter, Ursula Keller, Fritz K. Kneubuehl, Walter Lukosz, Hans Melchior, Markus W. Sigrist Vol. 40, ISBN 3-86628-108-0. (Cité pages vi, 15 et 16.)
- O Ostinelli, G Almuneau, et W Baechtold. Photoluminescence and band offset of type-II AlGaAsSb/InP heterostructures. *Semiconductor Science*



- and Technology*, 21(5) :681–685, 2006a. URL <http://stacks.iop.org/0268-1242/21/681>. (Cité page 18.)
- O. Ostinelli, G. Almuneau, M. Ebnöther, E. Gini, M. Haiml, et W. Bächtold. MOVPE growth of long wavelength AlGaAsSb/InP Bragg mirrors. *Electronics Letters*, 40(15) :940–942, 2004. ISSN 0013-5194. (Cité page 16.)
- O. Ostinelli, W. Bächtold, H. Haiml, R. Grange, U. Keller, E. Gini, et G. Almuneau. Carrier lifetime reduction in 1.5  $\mu$ m AlGaAsSb saturable absorbers with air and AlAsSb barriers. *Applied Physics Letters*, 89(7) :071114, 2006b. URL <http://link.aip.org/link/?APL/89/071114/1>. (Cité page 18.)
- O. Ostinelli, M. Haiml, R. Grange, G. Almuneau, M. Ebnöther, E. Gini, E. Mueller, U. Keller, et W. Bächtold. Highly reflective AlGaAsSb/InP Bragg reflector at 1.55[ $\mu$ ]m grown by MOVPE. *Journal of Crystal Growth*, 286(2) :247–254, Janvier 2006c. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJ6-4HNSJS8-1/2/f27bb1d39b8a50bc55366ee3c7090a35>. (Cité page 16.)
- Abdallah Ougazzaden, Elchuri Rao, Bernard Sermage, Laurent Leprince, et Marcel Gauneau. High-quality InGaAsN growth by metalorganic vapor-phase epitaxy using nitrogen carrier gas and dimethylhydrazine, tertiarybutylarsine as group V precursors. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 : Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 38(2B) :1019 – 1021, 1999. ISSN 0021-4922. URL <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.38.1019>. Dimethylhydrazine;Tertiarybutylarsine;Nonradiative carrier lifetime;Ambient gas;. (Cité page 17.)
- A. Ouvrard, A. Garnache, L. Cerutti, F. Genty, et D. Romanini. Single-frequency tunable Sb-based VCSELs emitting at 2.3/spl  $\mu$ /m. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(10) :2020–2022, 2005. (Cité page 64.)
- T. Paoli. Saturation behavior of the spontaneous emission from double-heterostructure junction lasers operating high above threshold. *IEEE Journal on Quantum Electronics*, 9(2) :267–272, Feb 1973. (Cité page 54.)
- P. Pellandini, R. P. Stanley, R. Houdré, U. Oesterle, M. Illegems, et C. Weisbuch. Dual-wavelength laser emission from a coupled semiconductor microcavity. *Applied Physics Letters*, 71(7) :864–866, 1997. URL <http://link.aip.org/link/?APL/71/864/1>. (Cité page 47.)
- J. Perchoux et T. Bosch. Multimode vcsels for self-mixing velocity measurements. Dans *Proc. IEEE Sensors*, pages 419–422, 28–31 Oct. 2007. (Cité page 54.)
- G. W. Pickrell, J. H. Epple, K. L. Chang, K. C. Hsieh, et K. Y. Cheng. Improvement of wet-oxidized al<sub>x</sub>ga<sub>1-x</sub>as ( $x < 1$ ) through the use of alas/gaas digital alloys. *Applied Physics Letters*, 76(18) :2544–2546, 2000. (Cité page 31.)

- M. Ravaro, E. Guillotel, M. Le D, C. Manquest, X. Marcadet, S. Ducci, V. Berger, et G. Leo. Nonlinear measurement of mid-infrared absorption in Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As waveguides. *Applied Physics Letters*, 92(15) :151111 –, 2008. ISSN 0003-6951. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.2911747>. Parametric fluorescence; Nonlinear waveguide; Infrared sources;. (Cité page 26.)
- H. Reese, Y. J. Chiu, et E. Hu. Low-temperature-grown GaAs enhanced wet thermal oxidation of Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As. *Applied Physics Letters*, 73(18) :2624–2626, 1998. URL <http://link.aip.org/link/?APL/73/2624/1>. (Cité page 33.)
- H. Roscher, F. Rinaldi, et R. Michalzik. Small-pitch flip-chip-bonded VCSEL arrays enabling transmitter redundancy and monitoring in 2-D 10-Gbit/s space-parallel fiber transmission. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 13(5) :1279–1289, Sept.–oct. 2007. (Cité page 54.)
- S.-W. Ryu et P.D. Dapkus. Room temperature operation of type-II GaAsSb/InGaAs quantum well laser on GaAs substrates. *Electronics Letters*, 38(12) :564 – 565, 2002. ISSN 0013-5194. URL <http://dx.doi.org/10.1049/el:20020410>. Quantum well laser diodes;. (Cité page 17.)
- T. Sarmiento, H.P. Bae, T.D. O'Sullivan, et J.S. Harris Jr. GaAs-based 1.53  $\mu\text{m}$  GaInNAsSb vertical cavity surface emitting lasers. *Electronics Letters*, 45 : 978, 2009. (Cité page 18.)
- J.N. Schulman et D.H. Chow. Sb-heterostructure interband backward diodes. *Electron Device Letters, IEEE*, 21(7) :353–355, Jul 2000. ISSN 0741-3106. (Cité page 21.)
- U. Seidel, B.E. Sagol, N. Szabo, K. Schwarzburg, et T. Hannappel. InGaAs/GaAsSb-interface studies in a tunnel junction of a low band gap tandem solar cell. *Thin Solid Films*, 516(20) :6723 – 6728, 2008. ISSN 0040-6090. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.013>. Band gaps; InGaP-GaAs; Tandem solar cells;. (Cité page 17.)
- H. Shimizu, K. Kumada, S. Uchiyama, et A. Kasukawa. High performance CW 1.26  $\mu\text{m}$  GaInNAsSb-SQW and 1.20  $\mu\text{m}$  GaInAsSb-SQW ridge lasers. *Electronics Letters*, 36(20) :1701–1703, 2000. (Cité page 18.)
- J. H. Shin, J. K. Hwang, K. H. Ha, et Y. H. Lee. Anomalous above-threshold spontaneous emission in gain-guided vertical-cavity surface-emitting lasers. *Applied Physics Letters*, 68(16) :2180–2182, 1996. URL <http://link.aip.org/link/?APL/68/2180/1>. (Cité page 54.)
- Jae-Heon Shin et Y. H. Lee. Determination of nonradiative recombination coefficients of vertical-cavity surface-emitting lasers from lateral spontaneous emission. *Applied Physics Letters*, 67(3) :314–316, 1995. URL <http://link.aip.org/link/?APL/67/314/1>. (Cité page 54.)
- R. P. Stanley, R. Houdré, U. Oesterle, M. Illegems, et C. Weisbuch. Coupled semiconductor microcavities. *Applied Physics Letters*, 65(16) :2093–2095, 1994. URL <http://link.aip.org/link/?APL/65/2093/1>. (Cité page 47.)

- I. Suarez, G. Almuneau, M. Condé, A. Arnoult, et C. Fontaine. Optimal control of AlAs oxidation via digital alloy heterostructure compositions. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2009. (Cité pages 35 et 39.)
- I. Suarez, M. Condé, L. Bouscayrol, C. Fontaine, et G. Almuneau. Structure-induced effects on the selective wet oxidation of digital Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As alloys. *Journal of Materials Research*, 2008. (Cité pages 34 et 35.)
- N. Suzuki, T. Anan, H. Hatakeyama, et M. Tsuji. Low resistance tunnel junctions with type-II heterostructures. *Applied Physics Letters*, 88 (23) :231103 -, 2006. ISSN 0003-6951. URL <http://dx.doi.org/10.1063/1.2210082>. Vertical-cavity surface-emitting lasers ;Type-II tunnel junction ;GaAs substrates ;C-doped GaAsSb ;. (Cité pages 17 et 20.)
- R. Thornton, Y. Zou, J. Tramontana, M. Hagerott Crawford, R.P. Schneider, et K.D. Choquette. Visible (670 nm) vertical cavity surface emitting lasers with indium tin oxide transparent conducting top contacts. Dans *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1995. 8th Annual Meeting Conference Proceedings, Volume 1., IEEE*, volume 2, pages 108–109 vol.2, Oct-2 Nov 1995. (Cité page 58.)
- S. Tibuleac et R. Magnusson. Reflection and transmission guided-mode resonance filters. *J. Opt. Soc. Am. A*, 14(7) :1617–1626, 1997. URL <http://josaa.osa.org/abstract.cfm?URI=josaa-14-7-1617>. (Cité page 60.)
- Rene Todt, Katharine Dovidenko, Alexei Katsnelson, Vadim Tokranov, Michael Yakimov, et Serge Oktyabrsky. Oxidation kinetics and microstructure of wet-oxidized mbe-grown short-period AlGaAs superlattices. Dans *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, volume 692, pages 561 – 566, Boston, MA, United States, 2002. Short-period superlattices (SPSL) ;. (Cité pages 31 et 35.)
- John R. Tucker, Johnathon L. Baque, Yah Leng Lim, Andrei V. Zvyagin, et Aleksandar D. Rakić. Parallel self-mixing imaging system based on an array of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Appl. Opt.*, 46(25) : 6237–6246, 2007. URL <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-46-25-6237>. (Cité page 55.)
- G. Ungaro, G. Le Roux, R. Teissier, et JC Harmand. GaAsSbN : a new low-bandgap material for GaAs substrates. *Electronics Letters*, 35 :1246, 1999. (Cité page 18.)
- J. P. van der Ziel et W. T. Tsang. Integrated multilayer GaAs lasers separated by tunnel junctions. *Applied Physics Letters*, 41(6) :499–501, 1982. URL <http://link.aip.org/link/?APL/41/499/1>. (Cité page 19.)
- Dieter Wiedenmann, Martin Grabherr, Roland Jager, et Roger King. High volume production of single-mode vcsels. Dans Chun Lei et Kent D. Choquette, éditeurs, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers X*, volume 6132, page 613202. SPIE, 2006. URL <http://link.aip.org/link/?PSI/6132/613202/1>. (Cité pages vi et 27.)

- T. Zhang, J.G. Wohlbiel, K.D. Choquette, et N. Tabatabaie. Microcavity vacuum-field configuration and the spontaneous emission power. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1(2) :606–615, June 1995. (Cité page 54.)
- Ye Zhou. *Subwavelength High-Contrast Grating (HCG) and its Applications in Optoelectronic Devices*. PhD thesis, EECS Department, University of California, Berkeley, Dec 2008. URL <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-172.html>. (Cité page 64.)
- Ye Zhou, M.C.Y. Huang, et C.J. Chang-Hasnain. Large fabrication tolerance for vcsels using high-contrast grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 20(6) :434–436, March 15, 2008a. (Cité page 61.)
- Ye Zhou, Michael C. Huang, et Connie J. Chang-Hasnain. Tunable vcsel with ultra-thin high contrast grating for high-speed tuning. *Opt. Express*, 16(18) :14221–14226, 2008b. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-16-18-14221>. (Cité page 60.)
- John C. Zolper, John F. Klem, Thomas A. Plut, et Chris P. Tigges. GaAsSb-based heterojunction tunnel diodes for tandem solar cell interconnects. Dans *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, volume 2, pages 1843 – 1846, Waikoloa, HI, USA, 1994. URL <http://dx.doi.org/10.1109/WCPEC.1994.520724>. Tandem solar cell interconnects ;Band alignment ;Valence band ;Tunneling currents ;Doping levels ;Poison equation ;Forward bias tunneling ;. (Cité page 20.)



# NOTATIONS

VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser
LW-VCSEL	Long wavelength Vertical cavity surface emitting laser (1.3-1.55 $\mu$ m)
DBR	Réflecteur de Bragg distribué
BiVCSEL ou CC-VCSEL	VCSEL à deux cavités couplées
MBE	Épitaxie par jets moléculaires
MOVPE	Metalorganic vapour phase epitaxy
RHEED	Reflection high energy electron diffraction
MEB	Microscopie électronique à balayage
SIMS	Secondary ion mass spectroscopy
MET ou TEM	Microscopie électronique en transmission
ICP-RIE	Inductively ion plasma reactive ion etching
LED	Light emitting diode
ITO	Indium tin oxide
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy
CVD	Chemical vapor deposition
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
TE	Polarisation : composante du champ électrique parallèle aux lignes du réseau
TM	Polarisation : composante du champ électrique perpendiculaire aux lignes du réseau
III	Éléments de la colonne III de la classification périodique de Mendeliev
V	Éléments de la colonne V de la classification périodique de Mendeliev
MO	Molécules organométalliques
AlO <sub>x</sub>	Oxyde d'aluminium
PAIO <sub>x</sub>	Oxydation thermique humide de l'AlAs par la surface
BD	Barrières de diffusion (couche élémentaire AlGaAs dans les pseudo-alliages AlAs/AlGaAs)
CP ou PC	Cristaux photoniques
OPO	Oscillateur paramétrique optique
WDM	Wavelength de-multiplexing
FTTH	Fiber to the home
FDTD	Finite Difference Time Domain
CAMFR	Cavity modelling framework

RCWA	Rigorous coupled-wave analysis
RODIS	Rigorous optical diffraction software
NCCR QP	National Centre of Competence in Research Quantum Photonics (NCCR QP) : instrument de recherche de la Swiss National Science Foundation (SNSF)
EELOT	Contrôle des Effets ELeCTro-Optiques Transverses dans les composants à cavité verticale
FunFACS	Fundamentals, Functionalities and Applications of Cavity Solitons
OSA <sub>131</sub>	Micro Module d'Emission 1,31 $\mu$ m pour application 10 Gb/s
MARSUPILAMI	Miroir à réseau sub-longueur d'onde pour les lasers à émission verticale dans le moyen infrarouge
LAAS	Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes
ETHZ	Swiss Federal Institute of Technology Zürich
FIRST	Frontiers In Research : Space & Time, a technology and cleanroom facility for advanced Micro- and Nanotechnology located at ETH Zurich (Science City campus)
EPFL	École polytechnique fédérale de Lausanne
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers
ANR	Agence nationale de la recherche
RTB	Recherche technologique de base
UCSB	University of California Santa Barbara
IES	Institut d'électronique du sud
INSA	Institut national des sciences appliquées
LPN	Laboratoire de photonique et de nanostructures
ENS	École normale supérieure
RMNT	Réseau micro nano technologie
LETI-CEA	Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information - commissariat à l'énergie atomique
ENSHEEIT	École Nationale Supérieure d'électronique d'électrotechnique d'informatique d'hydraulique et des télécommunications
$E_c$	Énergie de bande de conduction
$E_v$	Énergie de bande de valence
$E_g$	Énergie de bande interdite
$\lambda$	Longueur d'onde
$f$	Fréquence

# CURRICULUM VITAE



# Guilhem Almuneau

Né le 18 décembre 1970

Nationalité Française

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes  
Groupe Photonique  
LAAS-CNRS UPR8001  
7, avenue du Colonel Roche  
31077 Toulouse cedex 4

Phone : (33) 05.61.33.64.73

Fax : (33) 05.61.33.68.02

E-mail : [a.lmuneau@laas.fr](mailto:a.lmuneau@laas.fr)

## Titres Universitaires

- 1989 Baccalauréat C, Lycée Joffre, Montpellier.
- 1991 DEUG A (Mathématiques Physique, Chimie), Université Montpellier II.
- 1993 Maîtrise de Physique et Applications : Matériaux pour l'électronique, Mention Assez Bien, Université Montpellier II.
- 1995 DEA en Electronique, Mention Bien, Université Montpellier II.
- 1998 Thèse de Doctorat, Mention Très Honorable  
« Etude et réalisation de lasers à cavité verticale à 1,55  $\mu\text{m}$  sur GaSb »  
Université Montpellier II, soutenu le 18 Septembre 1998  
Directeur de Thèse : L. Chusseau  
Jury : R. Alabédra, *président*  
L. Goldstein, R. Planel, *rapporteurs*  
A. Joullié, J.-M. Lourtioz, J.-L. Oudar, *examineurs*

## Chronologie des fonctions et des activités de recherche

- Déc. 1995 - Nov. 1998 Doctorant Allocataire MESR au CEM2, Université Montpellier II.  
**Sujet** : « Etude et réalisation de lasers à cavité verticale à 1,55  $\mu\text{m}$  sur GaSb »
- Janv. 1999 - Août 2000 Postdoc à l'Université de Californie Santa Barbara, Etats-Unis.  
**Sujet** : « VCSELS antimoniures à 1,55  $\mu\text{m}$  sur InP »
- Nov. 2000 - Oct. 2003 Ingénieur de Recherche et Développement chez Avalon Photonics Ltd., Zurich, Suisse.
- Depuis Nov. 2003 Chargé de Recherche 1ère classe CNRS, au LAAS  
**Thématiques** : Technologie des semiconducteurs III-V pour les VCSELS et composants photoniques avancés, étude de l'oxydation thermique humide d'AlGaAs, développement de nouvelles géométries et nouvelles fonctionnalités pour les VCSELS.

## Administration de la recherche

### Expertise scientifique

- 2002 Rapporteur scientifique pour l'attribution d'un financement de recherche à l'Université des Sciences de Hong-Kong (HKUST) pour l'University Grants Committee (UGC) of Hong Kong
- depuis 2005 Expert dans la thématique « Matériaux et composants pour l'optique » à l'Observatoire des Micro et NanoTechnologies
- 2008 Rapporteur scientifique pour l'Agence Nationale de la Recherche

### Gestion et Participation à des contrats de recherche

- 1995-1998 Contrat Alcatel-UMII « Miroirs antimoniures pour les VCSELS à 1,55  $\mu\text{m}$  » (Participant)
- 2001-2005 Projet NCCR Quantum Photonics 9.B : « Monolithically integrated long wavelength VCSELS », budget : 320'000 € (Responsable scientifique Avalon)
- 2001-2003 Projet européen IST-1999-10450 GSQ « Gallium Arsenide Second-Window Quantum-Dot Lasers », budget : 180'000 € (Responsable scientifique Avalon)
- 2004-2005 Projet RNRT OSA 131 « Réalisation d'un transpondeur à 1.31  $\mu\text{m}$  à 10Gbit/s », Partenaires : IntexYs Photonics, LETI, Infineon. (Participant)
- 2002-2005 Projet européen IST STREP OPTONANOGEN « Integrated opto-nano-mechanical biosensor for fonctionnal genomic application », Partenaires : CRL Southampton, CNM Madrid, CNM Séville, CNM Barcelone et Genetrix (Participant)
- 2005-2008 Projet européen IST STREP FUNFACS « Fundamentals, Functionalities and Applications of Cavity Solitons », Partenaires : LPN Marcoussis, INLN Nice, INFN Bari, INFN Como, USTRAT Glasgow, Ulm Photonics (Participant)
- 2006- Laboratoire International Associé CNRS/KIST Corée du Sud « Cristaux Photoniques et Nanophotonique (CPN) », Partenaires : KAIST, KIST, KyungPook National University Daegu, LEOM INL (Coordination scientifique LAAS)
- 2006-2009 Projet ANR Jeunes Chercheurs EELOT « Contrôle des Effets Electro-Optiques Transverses dans les composants à cavité verticale », budget : 144'000 € (Responsable du projet)
- 2006-2009 Projet LAAS MIOPY « Micro-Optique Intégrée à base de Polymères » (Participant)
- 2009-2012 Projet ANR Blanc Marsupilami « Miroir A Réseau Sub-longueur d'onde Pour les Lasers à émission verticale dans le Moyen Infrarouge », Partenaires : IES Montpellier, Supélec Metz (Responsable du projet)

## **Participation à un jury de thèse externe**

- 2005 Participation au jury de thèse de Romuald Intartaglia à l'Université Montpellier II, « Spectroscopie optique des arsénio-nitrides de type (Ga,In)(As,N) : effets de concentration sur films minces et puits quantiques » soutenue le 9 décembre 2005  
**Jury** : P. Disseix, X. Marie, J.Y. Duboz, G. Almuneau, E. Tournié, T. Taliercio

## **Commissions d'enseignement et de laboratoire**

- 2006 Membre suppléant de la commission de spécialistes milieux denses et matériaux (28<sup>e</sup>section) de l'INSA de Toulouse
- 2008 Membre de jury de recrutement : poste de maître de conférence (63<sup>e</sup>section), à l'ENSEEIH / INP Toulouse
- 2009 Membre de jury de recrutement : poste de maître de conférence (63<sup>e</sup>section), à l'IES / Université Montpellier II
- depuis 2006 Membre de la commission « COMTEAM » : soutien technique des projets de recherche par la centrale de technologie du LAAS
- depuis 2006 Membre de la cellule de coordination du Centre de Caractérisation au LAAS

## Activités d'encadrement

### Encadrement de post-doctorant

- 2007-2009 Isaac Suárez  
« Low-scale AlOx technology for free design of the opto-electronic confinement in vertical cavity devices » (financement : projet EELOT)  
**Situation actuelle** : Postdoc à l'Université de Valencia

### Encadrement de doctorants

#### *Thèses en cours :*

- 2009-2012 Fares Chouchane (Co-directeur de Thèse : Chantal Fontaine)  
« Ingénierie du confinement électrique et optique dans les lasers à cavité verticale »  
Boursier Ministère de la Recherche
- 2009-2012 Youness Laaroussi (Co-directeur de Thèse : Laurent Cerutti - IES Montpellier)  
« Intégration de miroirs sub-longueur d'onde pour les VCSELs infrarouge »  
Financé par le projet ANR Marsupilami

#### *Thèses soutenues :*

- 2005-2008 Moustapha Condé (Co-directeur : Chantal Fontaine)  
« Composants optoélectroniques à microcavités verticales sur GaAs : Technologies avancées pour de nouvelles fonctions »  
Boursier Ministère de la Recherche  
**Situation actuelle** : Ingénieur R&D à Photonis (Brive)
- 2003-2006 Cédric Amat (Co-directeur : Thierry Camps)  
« Technologie et caractérisation de VCSELs à détection intégrée pour applications aux communications optiques et à l'instrumentation »  
Boursier du Fonds Social Européen (FSE)  
**Situation actuelle** : Ingénieur de production à Oerlikon AG (Liechtenstein)
- 2001-2005 Olivier Ostinelli (Directeur de Thèse : Prof. W. Baechtold, ETH Zurich)  
« Long Wavelength VCSELs with MOVPE Grown AlGaAsSb/InP Bragg Reflectors »  
Boursier Suisse financé par le projet NCCR  
**Situation actuelle** : Ingénieur de recherche à l'ETH Zurich

### Encadrement de stages ingénieur du CNAM

- 2005-2006 Patrice Collière  
« Système de contrôle in situ du diaphragme d'oxyde enterré dans les composants laser à cavité verticale »  
**Situation actuelle** : Ingénieur à AIROD Technologies SAS
- 2006-2007 Rémy Bossuyt  
« Contrôle in situ en temps réel du diaphragme de confinement d'un VCSEL réalisé par la technique d'oxydation thermique humide »  
**Situation actuelle** : Doctorant CIFRE Essilor/LAAS

## Encadrement de stages de master

- 2007 Camille Echampard  
« Etude de la Gravure de Cristaux Photoniques pour l'Application aux VCSELs »  
**Situation actuelle** : Ingénieur à VSEM (Vibrations Services Essais Maintenance)
- 2006 Souad Moundji  
« Phénomènes de diffusion lors de l'oxydation thermique sélective de dispositifs optoélectroniques »  
**Situation actuelle** : Doctorante IES / LAAS
- 2006 Maha Suleiman  
« Etude des propriétés optiques des VCSELs »  
**Situation actuelle** : Docteur ENSEEIHT / INP

## Enseignements

- |         |   |   |                     |
|---------|---|---|---------------------|
| 2004-   | Intervenant extérieur sur les applications industrielles des VCSELs | 2 <sup>e</sup> année de Master Phymatec (Université Montpellier II) | 8 h de cours annuel |
| 1995-98 | TP Calcul Numérique (C, Pascal)                                     | Elèves-ingénieurs ISIM (Université Montpellier II)                  | 192 h de TP         |

## Langues

- Anglais : lu et parlé couramment (2 ans aux USA)  
Espagnol, allemand : notions

## Divers

- Membre de l'European Optical Society
- Détenteur de 7 brevets d'invention
- Correcteur de publications pour IEEE, IEE, IOP, etc...
- Sauveteur secouriste du travail

## Liste des publications scientifiques

### Bilan statistique

TYPE DE PUBLICATION	NOMBRE
Reuves à comité de lecture	33
Conférences invitées dans des congrès	5
Actes de colloques internationaux à comité de lecture	16
Communications à des congrès	29
Séminaires	7
Thèse	1
Brevets	7
Rapports de contrats	6

### Reuves à comité de lecture

- [1] I. Suarez, G. Almuneau, M. Condé, A. Arnoult, and C. Fontaine. Optimal control of AlAs oxidation via digital alloy heterostructure compositions. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 42(17) :175105 (10pp), 2009.
- [2] I. Suarez, M. Condé, L. Bouscayrol, C. Fontaine, and G. Almuneau. Structure-induced effects on the selective wet thermal oxidation of digital  $Al_xGa_{1-x}As$  alloys. *Journal of Materials Research*, 23(11) :3006 – 3012, 2008.
- [3] G. Almuneau, R. Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M. Condé, I. Suarez, V. Bardinal, and C. Fontaine. Real-time in situ monitoring of wet thermal oxidation for precise confinement in VCSELs. *Semiconductor Science and Technology*, 23(10) :105021 (5pp), 2008.
- [4] C. Amat, G. Almuneau, P. Gallo, L. Jalabert, S. Moumdji, P. Dubreuil, T. Camps, J.B. Doucet, E. Harvard, V. Bardinal, C. Fontaine, and A. Muñoz Yagüe. Free engineering of buried oxide patterns in GaAs/AlAs epitaxial structures. *Electronics Letters*, 43(13) :730 – 732, 2007.
- [5] O. Ostinelli, M. Haiml, R. Grange, G. Almuneau, M. Ebnöther, E. Gini, E. Muller, U. Keller, and W. Bächtold. Highly reflective AlGaAsSb/InP Bragg reflector at 1.55  $\mu\text{m}$  grown by MOVPE. *Journal of Crystal Growth*, 286(2) :247 – 254, 2006.
- [6] V. Bardinal, T. Camps, E. Daran, C. Amat, G. Almuneau, C. Bringer, M. Suleiman, and C. Fontaine. Lateral waveguiding properties of VCSELs for integrated optical monitoring. *Optical and Quantum Electronics*, 38(4-6) :523 – 534, 2006.
- [7] O. Ostinelli, W. Bächtold, H. Haiml, R. Grange, U. Keller, E. Gini, and G. Almuneau. Carrier lifetime reduction in 1.5  $\mu\text{m}$  AlGaAsSb saturable absorbers with air and AlAsSb barriers. *Applied Physics Letters*, 89(7) :071114, 2006.
- [8] Young-Gu Ju, Guilhem Almuneau, Tae-Hoon Kim, and Baek-Woon Lee. Numerical analysis of high-index nano-composite encapsulant for light-emitting diodes. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 : Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 45(4 A) :2546 – 2549, 2006.
- [9] O. Ostinelli, G. Almuneau, and W. Bächtold. Photoluminescence and band offset of type-II AlGaAsSb/InP heterostructures. *Semiconductor Science and Technology*, 21(5) :681 – 685, 2006.
- [10] R. Intartaglia, T. Taliercio, P. Valvin, G. Almuneau, P. Lefebvre, T. Guillet, T. Bretagnon, and B. Gil. Longitudinal-optical phonon broadening due to nitrogen atom incorporation in InGaAsN/GaAs quantum wells. *Physica Status Solidi C : Confernces*, 2(11) :3887 – 3890, 2005.

- [11] T. Camps, C. Bringer, V. Bardinal, G. Almuneau, C. Amat, E. Daran, J.B. Doucet, P. Dubreuil, and C. Fontaine. High sensitivity integrated lateral detection in VCSELs. *Electronics Letters*, 41(3) :129 – 131, 2005.
- [12] O. Ostinelli, G. Almuneau, M. Ebnöther, E. Gini, M. Haiml, and W. Bächtold. MOVPE growth of long wavelength AlGaAsSb/InP Bragg mirrors. *Electronics Letters*, 40(15) :940 – 942, 2004.
- [13] L. Chusseau, G. Almuneau, L.A. Coldren, A. Huntington, and D. Gasquet. Coupled-cavity vertical-emitting semiconductor laser for continuous-wave terahertz emission. *IEE Proceedings : Optoelectronics*, 149(3) :88 – 92, 2002.
- [14] S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, H. Kroemer, and L.A. Coldren. 88 °C, continuous-wave operation of apertured, intracavity contacted, 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface-emitting lasers. *Applied Physics Letters*, 78(10) :1337 – 1337, 2001.
- [15] S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, H. Kroemer, and L.A. Coldren. 1.55  $\mu\text{m}$  InP-lattice-matched VCSELs with AlGaAsSb-AlAsSb DBRs. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 7(2) :224 – 230, 2001.
- [16] E. Hall, S. Nakagawa, G. Almuneau, J.K. Kim, and L.A. Coldren. Selectively etched undercut apertures in AlAsSb-based VCSELs. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13(2) :97 – 99, 2001.
- [17] S.K. Mathis, K.H.A. Lau, A.M. Andrews, E.M. Hall, G. Almuneau, E.L. Hu, and J.S. Speck. Lateral oxidation kinetics of AlAsSb and related alloys lattice matched to InP. *Journal of Applied Physics*, 89(4) :2458 – 2464, 2001.
- [18] G. Almuneau, E. Hall, S. Nakagawa, J.K. Kim, D. Lofgreen, O. Slöjund, C. Luo, D.R. Clarke, J.H. English, and L.A. Coldren. Molecular beam epitaxial growth of monolithic 1.55  $\mu\text{m}$  vertical cavity surface emitting lasers with AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors. *Journal of Vacuum Science and Technology B : Microelectronics and Nanometer Structures*, 18(3) :1601 – 1604, 2000.
- [19] E. Hall, S. Nakagawa, G. Almuneau, J.K. Kim, and L.A. Coldren. Room-temperature, CW operation of lattice-matched long-wavelength VCSELs. *Electronics Letters*, 36(17) :1465 – 1467, 2000.
- [20] A. Salesse, R. Hanfoug, Y. Rouillard, F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, A. Baranov, C. Alibert, J. Kieffer, E. Lebeau, and J.M. Luck. Wet oxidation of AlAsSb alloys catalyzed by methanol. *Applied Surface Science*, 161(3) :426 – 433, 2000.
- [21] Guilhem Almuneau, Eric Hall, Toshikazu Mukaihara, Shigeru Nakagawa, Chongyang Luo, David R. Clarke, and Larry A. Coldren. Improved electrical and thermal properties of InP-AlGaAsSb Bragg mirrors for long-wavelength vertical-cavity lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(10) :1322 – 1324, 2000.
- [22] G. Almuneau, E. Hall, S. Mathis, and L.A. Coldren. Accurate control of sb composition in AlGaAsSb alloys on InP substrates by molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 208(1) :113 – 116, 2000.
- [23] G. Almuneau, E. Hall, J. Kim, O. Slöjund, H. Kroemer, and L. Coldren. 1.55  $\mu\text{m}$  room temperature electrically pumped operation of fully lattice-matched Sb-based vertical cavity surface emitting lasers. *Optics & Photonics News*, 10 :41–+, September 1999.
- [24] E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, O. Slöjund, H. Kroemer, and L.A. Coldren. Electrically-pumped, single-epitaxial VCSELs at 1.55  $\mu\text{m}$  with Sb-based mirrors. *Electronics Letters*, 35(16) :1337 – 1338, 1999.
- [25] J.K. Kim, E. Hall, O. Slöjund, G. Almuneau, and L.A. Coldren. Room-temperature, electrically-pumped multiple-active-region VCSELs with high differential efficiency at 1.55  $\mu\text{m}$ . *Electronics Letters*, 35(13) :1084 – 1085, 1999.
- [26] L. Chusseau, G. Almuneau, and F. Genty. Antimonide distributed Bragg reflectors and vertical cavity lasers on inp and gasb for 1.55  $\mu\text{m}$  operation. *Recent research developments in quantum electronics*, 1 :85–100, 1999. ISBN 81-86846-48-4.

- [27] Frederic Genty, Guilhem Almuneau, Laurent Chusseau, Arnaud Wilk, Serge Gaillard, Guilhem Boissier, Pierre Grech, and Joel Jacquet. Growth and characterization of vertical cavity structures on InP with GaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors for 1.55  $\mu\text{m}$  emission. *Journal of Crystal Growth*, 201 :1024 – 1027, 1999.
- [28] G. Almuneau, F. Genty, A. Wilk, P. Grech, A. Joullie, and L. Chusseau. GaInSb/AlGaAsSb strained quantum well semiconductor lasers for 1.55  $\mu\text{m}$  operation. *Semiconductor Science and Technology*, 14(1) :89 – 92, 1999.
- [29] N. Bertru, A. Baranov, Y. Cuminal, G. Almuneau, F. Genty, A. Joullie, O. Brandt, A. Mazuelas, and K. H. Ploog. Long-wavelength (Ga, In)Sb/GaSb strained quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy. *Semiconductor Science And Technology*, 13(8) :936–940, 1998.
- [30] Frederic Genty, Guilhem Almuneau, Nicolas Bertru, Laurent Chusseau, Pierre Grech, Didier Cot, and Joel Jacquet. Molecular beam epitaxy growth and characterizations of AlGaAsSb/AlAsSb Bragg reflectors on InP. *Journal of Crystal Growth*, 183(1-2) :15 – 22, 1998.
- [31] G. Almuneau, F. Genty, L. Chusseau, N. Bertru, B. Fraisse, and J. Jacquet. Molecular beam epitaxy growth of 1.3  $\mu\text{m}$  high-reflectivity AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirror. *Electronics Letters*, 33(14) :1227 – 1228, 1997.
- [32] F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, G. Boissier, J.-P. Malzac, P. Salet, and J. Jacquet. High reflectivity te-doped GaAsSb/AlAsSb Bragg mirror for 1.5  $\mu\text{m}$  surface emitting lasers. *Electronics Letters*, 33(2) :140 – 141, 1997.
- [33] L. Gouskov, M. Perotin, G. Almuneau, and H. Luquet. Near-infrared electroabsorption in p(+)/n(-)/n(+) GaSb diodes. *Journal of Applied Physics*, 79(1) :49–52, 1996.

### Conférences invitées dans des congrès

- [34] Guilhem Almuneau. Les VCSELs, développements récents et nouvelles applications. In *Synthèse annuelle 2006 de l'OMNT. Matériaux et composants pour l'optique*, pages 57 – 61, Paris, France, Février 2006.
- [35] V. Bardinal, C. Bringer, T. Camps, E. Daran, G. Almuneau, C. Amat, and C. Fontaine. Integrated février photodetection in VCSELs. In *Proceedings of 2005 7th International Conference on Transparent Optical Networks, ICTON 2005*, volume 2, pages 120 – 125, Barcelona, Catalonia, Spain, 2005.
- [36] Sophie Bouchoule and Guilhem Almuneau. VCSELs 1,55  $\mu\text{m}$  en pompage électrique. In *Xèmes Journées Nationales de Microélectronique et d'Optoélectronique (JNMO)*, La Grande-Motte, France, 8-11 Mai 2004.
- [37] Guilhem Almuneau, Eric Hall, Shigeru Nakagawa, Toshikazu Mukaiharu, and Larry A. Coldren. 1550 nm VCSELs with Sb-based mirrors. In *European Optical Society Topical Meeting and Summer School on Semiconductor Microcavity Photonics*, Monte Verita - Ascona (Suisse), 21-25 Octobre 2000.
- [38] E. Hall, G. Almuneau, A. Huntington, R. Naone, L. Chusseau, H. Kroemer, and L.A. Coldren. Epitaxial long wavelength DBRs on InP : AlAsSb or lateral oxidation. In *LEOS Summer Topical Meeting*, pages 25 – 26, San Diego, CA, USA, 1999.

### Actes de colloques internationaux à comité de lecture

- [39] I. Suarez, M. Condé, G. Almuneau, L. Jalabert, P. Dubreuil, J.B. Doucet, L. Bouscayrol, and C. Fontaine. Study and fabrication of buried oxide layers in GaAs/AlAs structures for confinement engineering in photonic devices. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 6997, pages SPIE Europe ; Alsace International ; Conseil General du Bas-Rhin ; Region Alsace ; Communauté Urbaine de Strasbourg –, Strasbourg, France, 2008.



- [40] G. Amat, T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, G. Almuneau, E. Daran, and G. Fontaine. Integrated lateral detection in VCSELs for optical system monitoring. In *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest*, volume 2005, pages 291 – 292, Tokyo, Japan, 2005.
- [41] O. Ostinelli, E. Gini, M. Ebnöther, G. Almuneau, M. Haiml, R. Grange, U. Keller, and W. Bächtold. Metalorganic vapor-phase epitaxy of antimonide for application to 1.55  $\mu\text{m}$  VCSELs on InP substrates. In *Conference Proceedings - International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, volume 2005, pages 594 – 597, Glasgow, Scotland, United kingdom, 2005.
- [42] Charlotte Bringer, Véronique Bardinal, Yann Boucher, Emmanuelle Daran, Guilhem Almuneau, Thierry Camps, Cédric Amat, and Chantal Fontaine. Integrated lateral photodetection in vertical-cavity surface-emitting lasers using optical waveguiding. In *12th European Conference on Integrated Optics (ECIO'05)*, pages 490 – 493, Grenoble, France, 6 - 8 Avril 2005.
- [43] Charlotte Bringer, Veronique Bardinal, Emmanuelle Daran, Thierry Camps, Yann G. Boucher, Guilhem Almuneau, Olivier Gauthier-Lafaye, Pascal Dubreuil, Jean-Baptiste Doucet, and Chantal Fontaine. Detection of lateral spontaneous emission for VCSEL monitoring. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 5453, pages 209 – 216, Strasbourg, France, 2004.
- [44] S. Nakagawa, E.M. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, H. Kroemer, and L.A. Coldren. 1.55  $\mu\text{m}$ , InP-lattice-matched VCSELs operating at rt under CW. In *Conference Digest - IEEE International Semiconductor Laser Conference*, pages 151 – 152, Monterrey, CA, USA, 2000.
- [45] S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, H. Kroemer, and L.A. Coldren. 1.55  $\mu\text{m}$ , double-intracavity contacted, InP-lattice-matched VCSELs. In *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*, volume 2, pages 726 – 727, Rio Grande, 2000.
- [46] E. Hall, S. Nakagawa, G. Almuneau, J.K. Kim, D.A. Buell, and L.A. Coldren. 88°C, continuous-wave operation of 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity surface emitting lasers,. In *European Conference on Optical Communications*, page postdeadline paper 3.4, Munich, Allemagne, 2 - 7 septembre 2000.
- [47] C. LaBounty, G. Almuneau, A. Shakouri, and J.E. Bowers. Sb-based iii-v cooler. In *19th International Conference on Thermoelectrics*, Cardiff, Wales, August 2000.
- [48] Guilhem Almuneau, Eric M. Hall, Shigeru Nakagawa, Jin K. Kim, and Larry A. Coldren. Long-wavelength VCSELs with AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors lattice-matched on InP substrates. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, volume 3946, pages 48 – 56, San Jose, CA, USA, 2000.
- [49] G. Almuneau, E. Hall, J.K. Kim, O. Slöjund, H. Kroemer, and L.A. Coldren. MBE growth of Al-GaAsSb alloys for monolithic Vertical Cavity Surface Emitting Lasers emitting at 1.55  $\mu\text{m}$  at room temperature. In *North American MBE conference*, pages paper 7 – 1, Banff, Canada, Octobre 1999.
- [50] E. Hall, G. Almuneau, J.K. Kim, O. Slöjund, H. Kroemer, and L.A. Coldren. Design considerations in electrically-pumped, single-epitaxial VCSELs at 1.55  $\mu\text{m}$  with Sb-based mirrors. In *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS*, volume 1, pages 145 – 146, San Francisco, CA, USA, 1999.
- [51] G. Almuneau, E. Hall, J. Kim, O. Slöjund, H. Kroemer, and L.A. Coldren. 1.55  $\mu\text{m}$  room temperature electrically pumped operation of fully lattice-matched Sb-based vertical cavity surface emitting lasers. In *Lasers and Electro-Optics, 1999. CLEO '99. Summaries of Papers Presented at the Conference on*, pages CPD16/1–CPD16/2, May 1999.
- [52] Frederic Genty, Guilhem Almuneau, Laurent Chusseau, Arnaud Wilk, Serge Gaillard, Guilhem Boissier, Pierre Grech, and Joel Jacquet. Vertical cavity structures on InP and GaSb with Al-GaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors for 1.55  $\mu\text{m}$  emission. In *Tenth International Conference on Molecular Beam Epitaxy*, page PT4.18, Cannes, France, 31 Août - 4 Septembre 1998.
- [53] F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, S. Gaillard, B. Fournier, I. Barbereau, and J. Jacquet. First steps towards 1.3-1.55  $\mu\text{m}$  antimonide vertical cavity semiconductor lasers. In *1997 OSA Annual Meeting*,

*Symposium on Advances in Vertical-Cavity Surface Lasers*, page WZ2, Long Beach, California, USA, 12 - 17 Octobre 1997.

- [54] Guilhem Almuneau, Frederic Genty, Laurent Chusseau, Serge Gaillard, Nicolas Bertru, and Joel Jacquet. AlGaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors on InP for 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$  vertical cavity surface emitting lasers. In *LEOS Summer Topical Meeting*, pages 41 – 42, Montreal, Can, 1997.

## Communications à des congrès

- [55] G. Almuneau. High reflectivity monolithic sub-wavelength diffraction grating with gaas/alox stack. In *European Semiconductor Laser Workshop (ESLW-2009)*, Vienna (Austria), September 25-26 2009.
- [56] G. Almuneau, R. Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M. Condé, I. Suarez, B. Franc, V. Bardinal, and C. Fontaine. Real time in-situ monitoring of the wet thermal oxidation of al-based iii-v materials. In *French Symposium on Emerging Technologies for Micro-nanofabrication (JNTE 08)*, number Th-M8, Toulouse (France), November 19-21 2008.
- [57] G. Almuneau, R. Bossuyt, P. Collière, L. Bouscayrol, M. Condé, I. Suarez, V. Bardinal, and C. Fontaine. Procédé d'oxydation thermique humide sélective pour semiconducteurs III-V : réalisation d'un four spécifique munie d'un contrôle optique in-situ en temps réel. In *12èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO)*, number A.7, Oléron, France, 3 - 6 Juin 2008.
- [58] I. Suarez, M. Condé, G. Almuneau, L. Bouscayrol, C. Fontaine, and C. Bonafos. Modélisation de l'oxydation humide sélective dans les hétérostructures de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . In *12èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO)*, number F.9, Oléron (France), 3-6 Juin 2008.
- [59] M. Condé, I. Suarez, G. Almuneau, P. Dubreuil, and Fontaine C. Fabrication de couches isolantes enterrées à partir d'hétérostructures AlAs/GaAs pour le confinement dans les dispositifs optoélectroniques. In *12èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO)*, number F.10, Oléron (France), 3-6 Juin 2008.
- [60] M. Condé, C. Amat, G. Almuneau, L. Jalabert, P. Dubreuil, F. Christiano, and Fontaine C. Procédé d'oxydation planaire de structures gaas/alas pour la réalisation d'un oxyde enterré. In *Optique Grenoble 2007 - Horizons*, number P18, Grenoble (France), 2-5 juillet 2007.
- [61] E. Havard, V. Bardinal, T. Camps, G. Almuneau, J-B. Doucet, L. Salvagnac, and Fontaine C. Amélioration de l'uniformité d'injection électrique dans les VCSELs de grande dimension. In *Optique Grenoble 2007 - Horizons*, number P39, Grenoble (France), 2-5 juillet 2007.
- [62] G. Almuneau. Algaas vcsel technology. In *Lecture, Spring school on Solitons in Optical Cavities*, Cargèse/Corsica (France), May 8-13 2006.
- [63] C. Amat, T. Camps, E. Bardinal, V. and Daran, J.C. Marrot, H. Granier, G. Doucet, J.B. and Almuneau, and Fontaine C. Détection latérale intégrée dans un vcsel via un contact schottky. In *11èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO)*, Aussois (France), 4-7 Avril 2006.
- [64] E. Havard, T. Camps, V. Bardinal, M. Condé, C. Amat, G. Almuneau, L. Salvagnac, S. Pinaud, and Fontaine C. Etude et amélioration de l'injection électrique dans les VCSELs de grand diamètre. In *11èmes Journées Nano-Micro Electronique et Optoélectronique (JNMO)*, Aussois (France), 4-7 Avril 2006.
- [65] T. Intartaglia, T. Taliércio, P. Valvin, G. Almuneau, P. Lefebvre, T. Guillet, T. Bretagnon, and Gil B. Lo phonon broadening due to n incorporation in ingaasn/gaas qws. In *5th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures*, Glasgow (GB), 8-11 Juin 2005.
- [66] G. Almuneau, V. Bardinal, T. Camps, C. Bringer, C. Amat, E. Daran, and Fontaine C. Integrated lateral detection in VCSELs. In *International Workshop on PHysics & Applications of SEMiconductor LASERS (PHASE 2005)*, Metz (France), 29-30 Mars 2005.
- [67] T. Intartaglia, T. Taliércio, P. Valvin, T. Guillet, T. Bretagnon, P. Lefebvre, Gil B., and G. Almuneau. Dynamiques de recombinaisons des porteurs dans des puits quantiques gainasn/gaas. In *SFP 9e Journées de la Matière Condensée*, number MC21P4, Nancy, France, 30Août-3Sept 2004.

- [68] G. Almuneau, C. Bringer, V. Bardinal-delagnes, C. Amat, T. Camps, J.-B. Doucet, P. Dubreuil, C. Fontaine, and Chusseau L. VCSELs à double cavité pour la génération d'un battement thz. In *SFP 9e Journées de la Matière Condensée*, number MC23P4, Nancy, France, 30Août-3Sept 2004.
- [69] C. Bringer, V. Bardinal, E. Daran, T. Camps, G. Almuneau, C. Amat, P. Dubreuil, J.-B. Doucet, and Fontaine C. Détection latérale intégrée pour le contrôle de l'émission d'un vcsel. In *Xèmes Journées Nationales de Microélectronique et d'Optoélectronique (JNMO)*, page 187, La Grande-Motte, France, 8-11 Mai 2004.
- [70] O. Ostinelli, W. Bächtold, G. Almuneau, and Rocher A. Croissance par eptom de miroirs de Bragg algaassb/inp à  $1,55 \mu\text{m}$ . In *Xèmes Journées Nationales de Microélectronique et d'Optoélectronique (JNMO)*, page 209, La Grande-Motte, France, 8-11 Mai 2004.
- [71] O. Ostinelli, G. Almuneau, M. Ebnöther, E. Gini, M. Moser, K.H. Gulden, H. Jäckel, and Bächtold W. Growth of algaassb/inp Bragg-mirror structures. In *Swiss Physical Society (SPS) Annual Meeting*, Neuchâtel, Suisse, March 3-4 2004.
- [72] L. Chusseau, G. Almuneau, L.A. Coldren, A. Huntington, and Gasquet D. Vcsel à deux cavités couplées pour l'émission thz. In *GDR 'Microcavités et Cristaux Photoniques'*, Montpellier, France, 6-7 Décembre 2001.
- [73] G. Almuneau, L. Chusseau, D. Gasquet, A. Huntington, and Coldren L.A. Un laser semi-conducteur à deux cavités verticales couplées pour la réalisation d'un battement térahertz. In *20e Journées Nationales d'Optique Guidées*, pages 109-111, Toulouse, Nov. 2000.
- [74] L. Chusseau, G. Almuneau, D. Gasquet, and Coldren L.A. Tailoring coupled-cavity vertical-emitting semiconductor-laser for thz-beatings. In *NATO Advanced Research Workshop Terahertz Sources and Systems*, Château de Bonas, 32410 Castera-Verduzan, France, 21-28 Juin 2000.
- [75] L. Chusseau, D. Gasquet, G. Almuneau, and Coldren L.A. Conception d'un générateur optomicroonde basé sur une structure laser semi-conducteur à deux cavités verticales couplées. In *19e Journées Nationales d'Optique Guidée*, pages 145-147, Limoges, 6-8 Décembre 1999.
- [76] E. Hall, G. Almuneau, J. Kim, A. Huttington, R. Naone, H. Kroemer, and Coldren L.A. Progress in epitaxial long-wavelength VCSELs. In *1999 Annual Research Review of The Heterogeneous Optoelectronics Technology Center*, Santa Fe, New Mexico, USA, 13-14 Mai 1999.
- [77] G. Almuneau. Algaassb based on Bragg mirrors and microcavities for  $1.55 \mu\text{m}$ . In *European Optical Society Topical Meeting and Summer School on Semiconductor Microcavity Light Emitters*, Ascona, Suisse, 20-25 Septembre 1998.
- [78] F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, A. Wilk, G. Boissier, Grech P., and Jacquet J. Algaassb based on Bragg mirrors and microcavities for  $1.3 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$ . In *17th General Conference of the Condensed Matter Division European Physical Society*, number 14.06, Grenoble, France, Grenoble, France 25-29 Août 1998.
- [79] F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, S. Gaillard, D. Barbereau I. Fournier, and Jacquet J. Premiers pas vers des VCSELs antimoniures à  $1,3-1,55 \mu\text{m}$ . In *GDR Microcavités et Cristaux Photoniques, Thème Microcavités*, Toulouse, France, 3 Octobre 1997.
- [80] G. Almuneau, F. Genty, L. Chusseau, C. Picard, T. Taliencio, Lefebvre P., and Jacquet J. Croissance de multi-puits quantiques dans le système (Al)GaInAs sur AlGaAsSb en accord de maille sur inp. In *Douzième séminaire national d'Épitaxie par Jets Moléculaires*, Saint-Aygulf, France, 28 - 30 Mai 1997.
- [81] F. Genty, G. Almuneau, J.-P. Malzac, L. Chusseau, C. Alibert, Salet P., and Jacquet J. Miroir de Bragg à haut pouvoir réflecteur GaAsSb/AlAsSb pour lasers à semi-conducteurs à cavité verticale émettant à  $1,5 \mu\text{m}$ . In *16e Journées Nationales d'Optique Guidée*, number 71, Nice, 28-30 Octobre 1996.
- [82] L. Chusseau, F. Genty, G. Almuneau, J.-P. Malzac, C. Alibert, P. Salet, and J. Jacquet. (Al)GaAsSb/AlAsSb Bragg mirrors for  $1.5 \mu\text{m}$  use. In *1996 European Semiconductor Laser and Amplifier Workshop*, Lillehammer, Norvège, 19-21 Septembre 1996.

- [83] G. Almuneau, F. Genty, G. Boissier, S. Gaillard, L. Chusseau, C. Alibert, P. Salet, and J. Jacquet. Réalisation de miroirs de Bragg AlAsSb/GaAsSb sur InP. In *SFP 5e Journées de la matière condensée*, number 0126, Orléans, France, 28 - 30 Août 1996.

## Séminaires

- [84] G. Almuneau and C. Amat. Integrated lateral detection in VCSELs for optical system monitoring, July 2005. Séminaire invité, KAIST Daejeon, South Korea.
- [85] G. Almuneau. Les lasers à cavité verticale : état de l'art et perspectives, 23 mars 2004. Séminaire du pôle MINAS, LAAS-CNRS Toulouse.
- [86] G. Almuneau. VCSELs monolithiques pour les longueurs d'onde télécom : 1310-1550 nm, 9 décembre 2002. Séminaire invité, LAAS-CNRS, Toulouse.
- [87] G. Almuneau. VCSEL arrays for parallel optical data links, 24 Janvier 2002. SAT 'n LIGHT Project Kick-Off Meeting, Agence Européenne de l'Espace, Alcatel Space Industries, Toulouse.
- [88] G. Almuneau, O. Ostinelli, M. Moser, and K.H. Gulden. MOVPE growth of (Al)GaAsSb on InP substrates for LW-VCSELs, 13 Juin 2002. NCCR Quantum Photonics Review Panel, EPFL, Lausanne (Suisse).
- [89] G. Almuneau. 1550 nm VCSELs with Sb-based mirrors, 25 Juillet 2000. Séminaire invité, Avalon Photonics, Zürich (Suisse).
- [90] G. Almuneau. VCSELs à 1550nm avec des miroirs de Bragg antimoniures, 6 janvier 2000. Séminaire invité, LCR Thomson-csf, Orsay.

## Brevets

- [91] G. Almuneau, A. Muñoz Yagüe, T. Camps, C. Fontaine, and Bardinal V. Procédé d'oxydation planaire pour réaliser un isolant enterré localisé, Février 2005. FR2881876, WO2006/082322.
- [92] G. Almuneau and M. Moser. Indium-phosphide-based vertical-cavity surface-emitting laser, March 2003. EP1294063, US 2003/103543, DE60107679T.
- [93] G. Almuneau, L. Coldren, and E.M. Hall. Distributed Bragg reflectors incorporating Sb-material for long-wavelength vertical cavity surface emitting lasers, February 2002. WO02/17448, AU8547501, US2002024989.
- [94] G. Almuneau and Coldren L. AlGaAsSb/InP distributed Bragg reflectors, February 2002. WO02/17447, AU8662001.
- [95] G. Almuneau, E.M. Hall, S. Mathis, and Coldren L. Method of fabricating a distributed Bragg reflector by controlling material composition using molecular beam epitaxy, February 2002. WO02/17363, AU8547801, US2002025590.
- [96] G. Almuneau, E.M. Hall, S. Nakagawa, and L. Coldren. A method for aperturing vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs), February 2002. WO02/17361, AU8661401, US2002101894.
- [97] G. Almuneau and L. Coldren. Method of fabricating a distributed Bragg reflector having enhanced thermal and electrical properties, February 2002. WO2002/0024988.

## Thèses

- [98] G. Almuneau. *Etude et réalisation de lasers à cavité verticale à 1.55  $\mu\text{m}$  sur GaSb*. PhD thesis, Université Montpellier II, Septembre 1998.

## Rapports de contrats

- [99] G. Almuneau. Contrôle des effets électro-optiques transverses dans les composants à cavité verticale. Technical report, Décembre 2009. Projet ANR-06-JCJC-0029.
- [100] T. Camps, V. Bardinal, C. Bringer, C. Amat, E. Daran, G. Almuneau, J.B. Doucet, L. Jalabert, P. Dubreuil, and C. Fontaine. Micro-module d'émission  $1.31 \mu\text{m}$  à 10 GBit/s multi-standards. Technical report, Juin 2005. Projet RMNT OSA 131.
- [101] G. Almuneau. Rapports d'avancement annuels et rapport final d'activité de recherche, lifetime test station for quantum-dots lasers and VCSELs. Technical report, Février 2003. Projet Européen IST, Gallium Arsenide Second Windows Quantum-Dot Lasers (GSQ).
- [102] S. Hunziker and G. Almuneau. Status on long wavelength VCSELs : overview on promising technologies, expected performances. Technical report, Mai 2002. SAT 'n LIGHT Project, Agence Européenne de l'Espace.
- [103] G. Almuneau. Monolithically integrated long wavelength VCSELs. Technical report, Juin 2005. Rapports d'avancement annuels d'activité de recherche Projet du Fonds National Suisse pour la Recherche, National Center of Competences in Research (NCCR), Projet Quantum Photonics.
- [104] F. Genty, G. Almuneau, L. Chusseau, and C. Alibert. Rapports d'avancement semestriels et rapport final d'activité de recherche, caractérisation et fabrication de miroir vcsel. Technical report, Déc. 1998. Contrat Alcatel-Alsthom-Recherche, Convention UCP/9.95.



**Titre** Les lasers à cavité verticale infrarouge : d'une approche matériau à des géométries de composant innovantes

**Résumé** Les thèmes de recherche développés dans cette habilitation portent sur les lasers à cavité verticale (VCSELs) dans la gamme de longueur d'onde 0,85-1,55  $\mu$ m. La géométrie particulière de cet émetteur et son attractivité dans un contexte applicatif, autant pour son intégrabilité que pour son intérêt économique, a dicté les évolutions récentes des composants VCSEL. L'adaptation de cet émetteur aux multiples usages ambitionnés par les industriels a incité d'une part à élargir la bande spectrale d'émission, la plus convoitée étant celle des communications optiques, et d'autre part à intégrer sur puce ces composants dans une vision de combinaisons de fonctions élémentaires dans un système optique complexe. Je présenterai les contextes dans lesquels ces deux thématiques de recherche se sont développées, et comment s'y sont articulés mes projets de recherche.

**Mots-clés** Lasers à cavité verticale, infrarouge, optoélectronique, épitaxie, technologie, matériaux

**Title** Vertical cavity lasers : from materials towards innovative geometries for devices

**Abstract** The topics of the researches developed in this manuscript turns on vertical cavity lasers (VCSELs) in the wavelength range from 850 to 1550 nm. The particular geometry of this laser emitter, together with its attractiveness in the industrial applications context, regarding integration capabilities and economic interest, have paved the way for the recent evolutions of the VCSEL devices. The adaptation of this emitter to the wide field of industrial applications foreseen has urged in the past years, for one part to widen the emission band spectrum, the most coveted being the telecommunications window, but also to integrate on chip these lasers with the aim of combining elementary functionalities into complex optical systems. I present here the contexts in which these both research axes have been evolving recently, and how my research activities have been developed within these themes.

**Keywords** VCSEL, infrared emitter, optoelectronic, epitaxy, technology, materials